

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra mechaniky



## **Měření a numerické modelování hluku a vibrací železničního kola**

*Measurement and Numerical Modeling of Railway  
Wheel Noise and Vibration*

**Disertační práce**

Studijní program:  
Studijní obor:  
Školitel:  
Doktorand:

P2346      Strojní inženýrství  
3901V003   Aplikovaná mechanika  
Prof. Ing. Petr Horyl, CSc.  
Ing. Michal Weisz

Ostrava 2014

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem celou práci vypracoval samostatně, pod vedením školitele a že jsem v seznamu použité literatury uvedl všechny použité podklady.

Ostrava, březen 2014

Ing. Michal Weisz



## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval svému školiteli, prof. Ing. Petru Horylovi, CSc., za vstřícnost, podporu a ochotu při řešení problémů spojených s tématem této práce. Dále bych chtěl poděkovat prof. Ing. Jiřímu Tůmovi, CSc. z Katedry automatizace a řízení VŠB - TU Ostrava, za pomoc při řešení obtížnějších měřicích úloh a znalostní podporu.

Velký dík patří rovněž mým kolegům z Katedry mechaniky VŠB - TU Ostrava Ing. Aleně Bilošové, Ph.D. a Ing. Janu Szwedovi, Ph.D., za odbornou a technickou podporu v oblastech měření a matematického modelování. A konečně mé ženě za pochopení a morální podporu.

## Anotace

Předložená disertační práce se zabývá rozsáhlým výzkumem dynamických vlastností železničního kola. V práci je popsána řada experimentů vedoucích ke zjištění modálních a akustických vlastností železničního kola a jeho chování při buzení harmonickým signálem. Nedílnou součástí práce bylo i sestavení matematického modelu železničního kola a aplikace celé řady výpočtových úloh na tento model.

Při rozsáhlé experimentální modální analýze železničního kola byly vyhodnoceny vlastní frekvence, vlastní tvary volného kmitání železničního kola a v neposlední řadě hodnoty tlumení na jednotlivých vlastních tvarech kmitání. Měření bylo provedeno pomocí rázového kladívka se snímačem síly a jednoosým snímačem vibrací. Bylo zjištěno celkem 35 vlastních tvarů kmitání, u nichž byla provedena klasifikace a podrobný rozbor. Dále byl sestaven matematický model železničního kola pro řešení úlohy modální analýzy metodou konečných prvků. Model se podařilo odladit na velmi dobrou shodu s daty z experimentu.

Série experimentů pokračuje řešením harmonické analýzy železničního kola. Harmonická analýza byla provedena pro buzení osamělou harmonickou silou, a to hned v několika specifických směrech - radiálním, axiálním a obecném. V této části práce byla odvozena záznejová metoda, která umožnila významně přiblížit měřenou vlastní frekvenci skutečné hodnotě. V úloze harmonické analýzy byl proveden výběr kmitočtů pro následná akustická měření. Značná pozornost byla věnována i problematice rozštěpení vlastních tvarů kmitání.

Akustická měření byla zahájena měřením akustické holografie metodou *Beamformig*. Měření se podařilo úspěšně prokázat, že budicí účinky jsou pro celý vyšetřovaný frekvenční rozsah dostatečné a akustická odezva dobře měřitelná. Bylo zjištěno, že podobnost hlukových map a vizualizovaných vlastních tvarů kmitání je velmi vysoká. Dále byl navržen experiment, který umožnil určení hladin akustických výkonů vyzářených železničním kolem. Pro zpracování naměřených dat bylo připraveno několik SW aplikací. Výsledkem akustických měření jsou sestavené hlukové mapy prostoru nad železničním kolem a dále účinnosti osazeného hlukového tlumiče pro vybrané vlastní tvary kmitání.

Celá práce vznikla ve spolupráci s výrobcem železničních kol. Navrženými postupy a metodami se snaží maximálním možným způsobem reflektovat potřeby technické praxe. Výsledky získané v této práci byly využity při návrhu opatření vedoucích ke snížení hlučnosti vyráběných železničních dvojkolí.

## **Abstract**

The presented PhD. project deals with an extensive study of the dynamic properties of railway wheel. The paper describes a series of experiments that led to the detection of modal and acoustic properties of railway wheel and its behavior during a harmonic signal excitation. The compilation of a mathematical model of the railway wheel and the application of a number of computational tasks on this model was an integral part of the work.

Natural frequencies, undamped mode shapes and the damping parameter for each mode shape of the vibration were determined. The measurement was performed using an impact hammer with force transducer and uniaxial vibration sensor. 35 mode shapes were detected, classified and analyzed in detail. Besides these, was also set up the mathematical model of railway wheel for solving modal analysis using FEM. It managed the model has been set to a very good agreement with the experiment data.

A series of experiments continues with the harmonic analysis of railway wheel. Harmonic analysis was performed for individual harmonic force excitation, in several specific ways - radial, axial and combined. In this part of project the echo method was derived. This method significantly assimilated the measured natural frequency to the actual value. In harmonic analysis the frequencies for following acoustic measurement were selected. Considerable attention has been paid to the issue of splitting the mode shapes of the vibration.

Acoustic measurements were initiated by measurement of the acoustic holography using Beamforming method. Measurements prove that the excitation effect was sufficient and acoustic response well measurable for the entire investigated frequency range. It was found that the similarity of noise maps and visualized eigen mode shapes is very high. Then an experiment allowing the determination of levels of acoustic power emitted by the railway wheel was designed. During this procedure several SW applications were prepared for processing of measured data. Results of acoustics measurements are compiled noise maps of the area around the railway wheel and efficiency of fitted noise damper for selected mode shape vibration.

The whole work was developed in cooperation with the producer of railway wheels. The proposed procedures and methods described in the project reflect the needs of engineering practice. The results obtained in this work were used in the proposal of arrangements contributing to reduce the noise of railway wheelsets.

## Obsah

Obsah .....	4
Seznam příloh .....	6
Seznam obrázků .....	7
Seznam tabulek .....	9
Seznam použitého označení a zkratk .....	10
1 Úvod.....	12
2 Shrnutí stávajícího stavu řešené problematiky .....	14
3 Cíle disertační práce.....	16
4 Přípravná část řešení .....	17
4.1 Spolupráce s Bonatrans Group, a.s. ....	17
4.2 Návrh testovacího zařízení a jeho realizace.....	19
4.3 Zkušební prostředí - polobezodrazová místnost pro akustická měření.....	21
5 Experimentální modální analýza železničního kola .....	24
5.1 Základní principy experimentální modální analýzy.....	24
5.2 Přípravná část měření.....	28
5.3 Použité měřicí přístroje .....	31
5.4 Příprava projektu pro měření .....	33
5.4.1 Nastavení připojeného HW .....	33
5.4.2 Tvorba geometrického modelu .....	34
5.4.3 Definice potřebných stupňů volnosti .....	35
5.4.4 Měřicí sekvence .....	35
5.4.5 Nastavení parametrů FFT analýzy .....	36
5.4.6 Nastavení časových oken měřených signálů.....	36
5.4.7 Měření frekvenčních přenosových funkcí a jejich export.....	38
5.5 Zpracování naměřených přenosových funkcí .....	40
6 Výpočtová modální analýza železničního kola .....	44
6.1 Příprava matematického modelu pro řešení úlohy.....	44
6.2 Vlastní výpočet .....	49
7 Vizualizace vlastních tvarů kmitání.....	50
8 Harmonická analýza železničního kola .....	52

8.1	Navržený postup - všeobecné podmínky .....	52
8.2	Použité měřicí přístroje.....	54
8.3	Příprava projektu pro měření .....	58
8.4	Výsledky získané harmonickou analýzou .....	60
8.4.1	Radiální buzení .....	63
8.4.2	Axiální buzení .....	64
8.4.3	Kombinované buzení .....	65
8.4.4	Budící kmitočty pro akustická měření .....	66
8.5	Alternativní stanovení tlumení železničního kola .....	67
8.5.1	Odečet tlumení z třídecibellového poklesu.....	67
8.5.2	Odečet tlumení z impulsní odezvy .....	68
8.5.3	Aplikace popsanych metod na železniční kolo.....	69
8.5.4	Popis jednoho cyklu verifikační procedury .....	76
8.5.5	Získané výsledky .....	78
9	Orientační měření akustiky metodou Beamforming .....	81
9.1	Použitá měřicí technika a postup měření .....	81
9.2	Výsledky měření.....	84
9.3	Poznátky vyplývající z provedeného měření.....	88
10	Akustická měření železničního kola.....	89
10.1	Teoretický rozbor úlohy .....	91
10.2	System měření a použitá měřicí technika .....	94
10.3	Sběr a zpracování naměřených dat .....	97
10.3.1	Nástroj pro měření hladin akustických tlaků .....	97
10.3.2	Hlukové mapy a výpočet hladin akustických výkonů .....	100
10.4	Výsledky provedených akustických měření .....	101
11	Závěr.....	109
12	Přínosy pro vědní obor a technickou praxi.....	111
	Seznam použité literatury .....	112
	Seznam publikační činnosti doktoranda .....	114
	Přílohy .....	116

## Seznam příloh

<b>Příloha 1</b>	<b>Grafické výstupy z programu STAR a Ansys</b>	<b>117 - 152</b>
P 1.1	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.1	117
P 1.2	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.2	118
P 1.3	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.3	119
P 1.4	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.4	120
P 1.5	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.5	121
P 1.6	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.6	122
P 1.7	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.7	123
P 1.8	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.8	124
P 1.9	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.9	125
P 1.10	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.10	126
P 1.11	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.11	127
P 1.12	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.12	128
P 1.13	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.13	129
P 1.14	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.14	130
P 1.15	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.15	131
P 1.16	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.16	132
P 1.17	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.17	133
P 1.18	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.18	134
P 1.19	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.19	135
P 1.20	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.20	136
P 1.21	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.21	137
P 1.22	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.22	138
P 1.23	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.23	139
P 1.24	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.24	140
P 1.25	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.25	141
P 1.26	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.26	142
P 1.27	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.27	143
P 1.28	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.28	144
P 1.29	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.29	145
P 1.30	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.30	146
P 1.31	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.31	147
P 1.32	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.32	148
P 1.33	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.33	149
P 1.34	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.34	150
P 1.35	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.35	151
P 1.36	Grafické výstupy z programu <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> pro vlastní tvar kmitání č.36	152
<b>Příloha 2</b>	<b>Výpis programu pro zpracování dat z akustických měření</b>	<b>153 - 154</b>
P 2.1	Výpis programu pro vykreslení hlukových map	153
P 2.2	Výpis programu pro vykreslení hlukových map	154
<b>Příloha 3</b>	<b>Náhled výrobní dokumentace vyráběných pomůcek</b>	<b>155 - 157</b>
P 3.1	Výkres sestavení stojanu pro uchycení dynamického budiče	155
P 3.2	Výkres sestavení improvizované reflexní roviny pod železniční kolo	156
P 3.3	Výrobní výkres portálového stojanu pro měření hlukových map	157
<b>Příloha 4</b>	<b>Závěry rešerše dostupných zdrojů informací</b>	<b>158</b>

## Seznam obrázků

Obr.1: Schématické znázornění ideové formulace cílů disertační práce .....	15
Obr.2: Fotodokumentace průvodního měření vybuditelnosti železničního dvojkolí .....	18
Obr.3: Orientační výkres návrhu uložení železničního kola na zkušebním základu .....	19
Obr.4: Rozměry absorpčního klínu a pohled do polobezodrazové místnosti VŠB-TU Ostrava.....	21
Obr.5: Hladina akustického tlaku uvnitř polobezodrazové místnosti - hluk pozadí .....	22
Obr.6,a: Železniční kolo s osou po přepravě na laboratoře .....	23
Obr.6,b: Smontovaná měřená sestava osazená v polobezodrazové místnosti .....	23
Obr.7: Model dynamického systému s $n^{\circ}$ volnosti .....	25
Obr.8: Základní názvosloví topologie železničního kola.....	28
Obr.9: Rozměrové schéma rozložení měřicí sítě na měřené sestavě - nárys .....	29
Obr.10: Rozměrové schéma rozložení měřicí sítě na měřené sestavě - půdorys .....	30
Obr.11: Detailní pohled na část železničního kola s naznačenou sítí a modální kladívko .....	31
Obr.12: Schématické znázornění sestavy - experimentální modální analýza .....	31
Obr.13: Geometrický model měřené soustavy železničního kola a základu.....	34
Obr.14: Detailní pohledy na vybraná místa modelu s definovanými směry buzení .....	35
Obr.15: Časové vážení budicího signálu .....	37
Obr.16: Časové vážení odezvy .....	37
Obr.17: Nastavení prahu spuštění na vzorku budicího signálu.....	37
Obr.18: Ukázka změřeného frekvenčního přenosu $H_1(f)$ pro náhodně vybraný pár bodů .....	38
Obr.19: Ukázka funkce koherence $\gamma^2(f)$ pro měřený pár bodů dle obr.18.....	39
Obr.20: Geometrický model železničního kola zobrazený v aplikaci The STAR Systém .....	40
Obr.21: Frekvenční přenosová funkce v referenčním bodě železničního kola.....	41
Obr.22: Detailní pohled na frekvenční přenosovou funkci při výběru rezonančních pásem .....	41
Obr.23: Základní profil železničního kola a jeho osy vytvořený pomocí ploch .....	45
Obr.24: Prostorový geom. model železničního kola.....	45
Obr.25: Popis geometrie konečného prvku „SOLID 45“ převzatý z programu Ansys.....	46
Obr.26: Řez výpočtovým modelem železničního kola a jeho osy .....	47
Obr.27: Detailní pohled na síť věnce a disku, půdorys železničního kola .....	48
Obr.28: Osa železničního kola s aplikovanými okrajovými podmínkami.....	48
Obr.29: Příklad vypuštěného torzního vlastního tvaru kmitání osy železničního kola .....	50
Obr.30: Schématické znázornění působišť a směrů budících sil pro použitá buzení.....	53
Obr.31: Rozmístění bodů pro měření odezev na diskové části kola (body č.63, č.139 a č.165) .....	53
Obr.32: Schématické znázornění harmonické analýzy železničního kola .....	54
Obr.33: Celkový pohled na měřenou sestavu při harmonické analýze .....	55
Obr.34: Detailní zobrazení připojeného dynamického budiče.....	55
Obr.35: Detailní zobrazení osazených snímačů zrychlení .....	55
Obr.36: Blokové schéma uspořádání měřicího řetězce .....	56
Obr.37: Frekvenční spektrum zrychlení na povrchu kola v bodě 165 při širokopásmovém buzení.....	59
Obr.38: Ukázka grafických výstupů harmonické analýzy pro buzení na kmitočku 382 Hz.....	59
Obr.39: Detailní zobrazení části frekvenčního spektra při výchozím měření.....	60
Obr.40: Detailní zobrazení části frekvenčního spektra při druhém kroku zpřesňování.....	61
Obr.41: Detailní zobrazení části frekvenčního spektra při posledním kroku zpřesňování .....	61
Obr.42: Přehledový náčrt zvolených směrů buzení železničního kola .....	62
Obr.43: Odečet šířky 3dB pásma pro stanovení konstanty dozívání.....	68
Obr.44: Schématické znázornění odečtu tlumení z impulsní odezvové funkce.....	69
Obr.45: Měřené železniční kolo založené ve svislé poloze v dřevěném lůžku.....	70
Obr.46: Tenká obdélníková deska pro demonstraci rozštěpení vlastního tvaru kmitání.....	70
Obr.47: Předpokládaný průběh frekv. přenosové funkce v okolí rezonance pro dvojici bodů 1-S.....	71
Obr.48: Předpokládaný průběh frekv. přenosové funkce v okolí rezonance pro dvojici bodů 2-S.....	71
Obr.49: Předpokládaný průběh frekv. přenosové funkce v okolí rezonance pro dvojici bodů 3-S.....	72
Obr.50: Zoom významné rezonanční špičky pro buzení širokopásmovým náhodným signálem.....	73

Obr.51: Frekvenční přenosová funkce v okolí jedné z rezonancí zjištěná pomocí FFT.....	73
Obr.52: Detailní zobrazení významné rezonanční špičky při aplikaci FFT v režimu zoom.....	74
Obr.53: Impulsní odezвовá funkce jednoho z vlastních tvarů kmitání se zřejmým rozštěpením.....	75
Obr.54: Impulsní odezвовá funkce jednoho z vlastních tvarů kmitání s kompenzací rozštěpení.....	75
Obr.55: Impulsní odezвовá funkce vlastního tvaru kmitání s krátkou dobou doznívání.....	76
Obr.56: Radiální vlastní tvar kmitání železničního kola na frekvenci 4110Hz.....	77
Obr.57: Body použité pro harmonickou analýzu vybrané ze základní měřicí sítě.....	78
Obr.58: Část frekvenčního spektra zrychlení nalezená při harmonické analýze v programu Ansys.....	79
Obr.59: Ukázka grafického výstupu verifikační procedury pro řešený vlastní tvar kmitání.....	80
Obr.60: Uspořádání měřicí sestavy pro realizaci akustické holografie metodou Beamforming.....	82
Obr.61: Uspořádání buzení a mikrofonního pole při měření technikou Beamforming.....	83
Obr.62: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 889Hz.....	84
Obr.63: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 1940Hz.....	84
Obr.64: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 2100Hz.....	85
Obr.65: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 2430Hz.....	85
Obr.66: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 2458Hz.....	85
Obr.67: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 2768Hz.....	86
Obr.68: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 2953Hz.....	86
Obr.69: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 3168Hz.....	86
Obr.70: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 3364Hz.....	87
Obr.71: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 3387Hz.....	87
Obr.72: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 4359Hz.....	87
Obr.73: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 4570Hz.....	87
Obr.74: Schématické znázornění měřeného železničního kola při určování hladiny ak. výkonu.....	90
Obr.75: Schématické znázornění zvoleného tvaru měřicí plochy a její dělení.....	93
Obr.76: Systém vzájemného propojení použité měřicí techniky.....	95
Obr.77: Systém řazení jednotlivých nástrojů při měření hladin akustických tlaků.....	97
Obr.78: Graf. znázornění dat získaných při ověřování lin. přenosu pro buzení na kmitočtu 889Hz.....	99
Obr.79: Deskový tlumič k osazení na diskovou část měřeného železničního kola.....	101
Obr.80: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 313Hz.....	101
Obr.81: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 889Hz.....	102
Obr.82: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 1634Hz.....	102
Obr.83: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 1940Hz.....	102
Obr.84: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 2427Hz.....	103
Obr.85: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 2457Hz.....	103
Obr.86: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 2705Hz.....	103
Obr.87: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 2767Hz.....	104
Obr.88: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 2969Hz.....	104
Obr.89: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 3365Hz.....	104
Obr.90: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 3609Hz.....	105
Obr.91: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 4352Hz.....	105
Obr.92: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 4930Hz.....	105
Obr.93: Graf. znázornění norm. hladin ak. výkonů netlumeného kola a kola s tlumičem.....	106
Obr.94: Graf. znázornění vypočítaných rozdílů normovaných hladin akustických výkonů.....	107
Obr.95: Grafické znázornění vypočítaných účinností osazeného deskového tlumiče.....	108



## Seznam tabulek

Tab.1: Hmotnosti jednotlivých prvků měřené sestavy .....	20
Tab.2: Číselné hodnoty výsledků experimentální modální analýzy .....	43
Tab.3: Výpis použitých materiálových konstant .....	47
Tab.4: Ukázka karty pro vlastní tvar kmitání č.4, graf. výstupy z programů <i>STAR</i> a <i>Ansys</i> .....	51
Tab.5: Výpis efektivních hodnot sil a zrychlení pro radiální směr buzení.....	63
Tab.6: Výpis efektivních hodnot sil a zrychlení pro axiální směr buzení.....	64
Tab.7: Výpis efektivních hodnot sil a zrychlení pro kombinovaný směr buzení.....	65
Tab.8: Výpis budících frekvencí vybraných pro akustická měření železničního kola .....	66
Tab.9: Výsledky verifikační procedury pro radiální vlastní tvar kmitání na frekvenci 4111Hz .....	79
Tab.10: Tabulkové zobrazení uspořádání výsledkového souboru .....	98
Tab.11: Normované hladiny akustických výkonů netlumeného kola a kola s tlumičem.....	106
Tab.12: Vypočítané rozdíly normovaných hladin akustických výkonů.....	107

## Seznam použitého označení a zkratk

$A(i\omega)$	inertance	$[\text{kg}^{-1}]$
$F$	síla	$[\text{N}]$
$H(i\omega)$	receptance	$[\text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^2]$
$H_1(f)$	frekvenční přenos s větším podílem šumu na vstupu	$[\text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^2]$
$I$	akustická intenzita	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$
$I_0$	referenční hodnota akustické intenzity	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$
$L_a$	zrychlení v hladinovém vyjádření	$[\text{dB}]$
$L_I$	hladina akustické intenzity	$[\text{dB}]$
$L_P$	hladina akustického tlaku	$[\text{dB}]$
$\overline{L_{Pf}}$	průměrná hladina akustického tlaku na měřicí ploše	$[\text{dB}]$
$L_W$	hladina akustického výkonu	$[\text{dB}]$
$L_{WN}$	hladina akustického výkonu normovaná na jednotkovou sílu	$[\text{dB}]$
$M, N$	celkové počty ploch pro sumační vzorce	$[-]$
$S$	plocha	$[\text{m}^2]$
$W$	akustický výkon	$[\text{W}]$
$W_0$	referenční hodnota akustického výkonu	$[\text{W}]$
$W_N$	akustický výkon normovaný na jednotkovou sílu	$[\text{W}]$
$Y(i\omega)$	velocitance	$[\text{kg}^{-1} \cdot \text{s}]$
$b_r$	poměrný útlum vyjádřený v procentech	$[\%]$
$e$	Eulerovo číslo - základ přirozeného logaritmu	$[-]$
$f$	frekvence	$[\text{Hz}]$
$h(t)$	impulsní odezвовá funkce v hladinovém vyjádření	$[\text{dB}]$
$i$	imaginární jednotka	$[-]$
$i, j, k, q$	indexy pořadí, počtu a směru v obecných vztazích	$[-]$
$m$	hmotnost	$[\text{kg}]$
$p$	akustický tlak	$[\text{Pa}]$
$p_0$	referenční hodnota akustického tlaku	$[\text{Pa}]$
$r_m$	poměr hmotností	$[-]$
$t$	čas	$[\text{s}]$
$z_0$	vlnový odpor prostředí	$[\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}]$

$\Delta_{L_{WN}}$	rozdíl normovaných hladin akustických výkonů	[dB]
$\lambda$	vlastní číslo	[s <sup>-1</sup> ]
$\Omega$	vlastní kruhová frekvence tlumeného kmitání	[s <sup>-1</sup> ]
$\Omega_0$	vlastní kruhová frekvence netlumeného kmitání	[s <sup>-1</sup> ]
$\delta$	konstanta doznívání	[s <sup>-1</sup> ]
$\gamma^2(f)$	funkce koherence	[-]
$\eta_W$	výkonová účinnost	[%]
$\nu$	prvek vlastního vektoru	[-]
$\omega$	úhlová rychlost	[s <sup>-1</sup> ]
$\xi$	poměrný útlum	[-]
$[B]$	matice viskózního tlumení	[kg·s <sup>-1</sup> ]
$[D]$	matice hysterézního tlumení	[kg·s <sup>-2</sup> ]
$[K]$	matice tuhosti	[kg·s <sup>-2</sup> ]
$[M]$	matice hmotnosti	[kg]
$\{F_A\}$	sloupcový vektor komplexních amplitud budicích účinků	[kg·m·s <sup>-2</sup> ]
$\{X_A\}$	sloupcový vektor komplexních amplitud výchylek	[m]
$\{f\}$	sloupcový vektor budicích účinků	[N]
$\{x\}$	sloupcový vektor výchylek	[m]
$\{\dot{x}\}$	sloupcový vektor rychlostí	[m·s <sup>-1</sup> ]
$\{\ddot{x}\}$	sloupcový vektor zrychlení	[m·s <sup>-2</sup> ]
$\{v\}$	vlastní vektor	[-]

FRF Frequency Response Function (frekvenční přenosová funkce)

FFT Fast Fourier Transform (rychlá Fourierova transformace)

MKP Metoda konečných prvků

# 1 Úvod

Kvalitu životního prostředí je v dnešní době možno posuzovat nejrůznějšími způsoby. Za zcela běžné již považujeme sledování místních limitů škodlivin v ovzduší, hustotu silničního provozu, kvalitu ozónové vrstvy a spoustu dalších aspektů, které ať už přímo, nebo nepřímo ovlivňují přirozené životní prostředí pro lidský život. Jedním z mnoha negativních projevů lidské činnosti, byť často poněkud opomíjeným, je bezpochyby hluk, který vzniká v důsledku lidské činnosti.

Není sice možné prokázat, že hluk dokáže ovlivnit například délku lidského života, je však zcela zřejmé, že zásadním způsobem ovlivňuje jak psychickou pohodu člověka, tak životnost poměrně složitého lidského sluchového ústrojí. Proto není divu, že v moderní technické praxi se věnuje problematice hluku stále více pozornosti a spousta řešených úloh má akustickou optimalizaci na jednom z prvních míst v žebříčku priorit. Oblastí, v níž má tento trend již dlouholetou tradici, je bezesporu automobilový průmysl. Akustický komfort posádky osobního automobilu je v posledních letech jednou z priorit i v oblasti vozů nižší střední třídy a splnění poměrně přísných hlukových kritérií se požaduje i po vozidlech nejnižší cenové kategorie. Hluková problematika luxusních vozů je pak královskou disciplínou ve využívání moderních měřicích metod a špičkové měřicí techniky. Již dávno opustila rutinní měření hladin vnějších a vnitřních hluků vozidel. U těchto se automaticky předpokládá, že jsou hluboko pod hranicí, která by mohla posádku vozidla obtěžovat. Aktuální problematika představuje mnohem sofistikovanější proces hodnocení kvality zvuků, které při používání vozidla nebo jeho funkčních částí vznikají, a snaží se konstrukčními zásahy do těchto celků doslova naladit konkrétní zařízení tak, aby byl zvuk generovaný jeho používáním uživatelsky příjemný.

Obdobnou vývojovou linii sleduje i přeprava osob v železniční dopravě. Moderní osobní železniční vozy pro dálkovou přepravu svou výbavou a povolenou rychlostí mohou bez problémů konkurovat luxusním automobilům a snaží se ve všech směrech nabídnout minimálně srovnatelné podmínky. Proto není divu, že i v této oblasti se čím dál tím více řeší i otázka provozního hluku. Posuzování a řešení hlukových problémů v oblasti automobilové a železniční přepravy však s ohledem na rozdílný charakter dominantních zdrojů hluku vyžadují zcela odlišné přístupy.

Zatímco u automobilu lze za dominantní zdroj hluku považovat pohonné ústrojí a aerodynamické hluky způsobené obtékáním vozidla vzduchem během jízdy, u železničního

vozu je převážná část problémů s hlukem buďto přímo, nebo nepřímo spojená s odvalováním ocelového železničního kola po ocelové kolejnici. Velkou částí tohoto problému jsou pak hluky vyzařené samotným železničním kolem. Železniční kolo je díky svým tvarovým a mechanickým proporcím schopno na určité druhy buzení zareagovat velmi vysokými efektivními hodnotami vibrací, což v konečném důsledku, při uvažování plochy železničního kola, představuje vysoké hladiny akustických tlaků šířící se do jeho okolí.

Jednou z cest, která bezesporu vede ke zlepšení situace, je použití dynamických hlukových tlumičů, které částečně zamezují šíření akustické energie do okolí. Výrobou železničních kol a vývojem výše zmíněných tlumičů se na velmi vysoké úrovni zabývá společnost Bonatrans Group, a.s., která má s touto problematikou dlouholeté zkušenosti. I zde však vyvstal problém, jakým způsobem účinnost dynamických hlukových tlumičů posuzovat, jaké dostupné měřicí a simulační prostředky použít a zda vůbec lze sestavit obecný postup, na jehož základě by bylo možné posuzovat vlastnosti dynamických tlumičů a jejich účinnost. Všechny výše položené otázky vedly k zadání této disertační práce, která se popsanou problematikou zabývá.

Myšlenkou této práce je realizace rozsáhlé série vibračních a akustických měření, na jejichž základě bude dále možné, ve spolupráci s odborníky z Bonatrans Group, a.s. a kolegy z katedry mechaniky VŠB-TU Ostrava, připravit matematický model železničního kola se skutečně vysokou vypovídající schopností. Aby bylo možné zaručit dobrou shodu fyzikálního a numerického modelu železničního kola, byl celý postup měření a následného doladování numerického modelu železničního kola rozdělen na tři základní části. V první etapě byla provedena experimentální modální analýza železničního kola, na jejímž základě byly upraveny materiálové konstanty tak, aby si odpovídaly vlastní frekvence a vlastní tvary kmitání obou modelů. Následovala harmonická analýza železničního kola, kde byly na základě zjištěných výchylek upraveny konstanty tlumení numerického modelu.

V poslední fázi bylo provedeno hlukové měření v akustickém poli nad železničním kolem s cílem stanovit mechanicko-akustické frekvenční přenosy mezi budicí silou a akustickou odezvou v okolí železničního kola. Za předpokladu, že následná numerická simulace mechanicko-akustického problému prokáže dobrou shodu s fyzikálním modelem, bude možné účinnost dynamických hlukových tlumičů, nebo případných konstrukčních úprav, s vysokou mírou spolehlivosti provádět přímo na numerickém modelu. Je zcela zřejmé, že takovýto postup je z hlediska investovaného času a prostředků nesrovnatelně výhodnější.

## 2 Shrnutí stávajícího stavu řešené problematiky

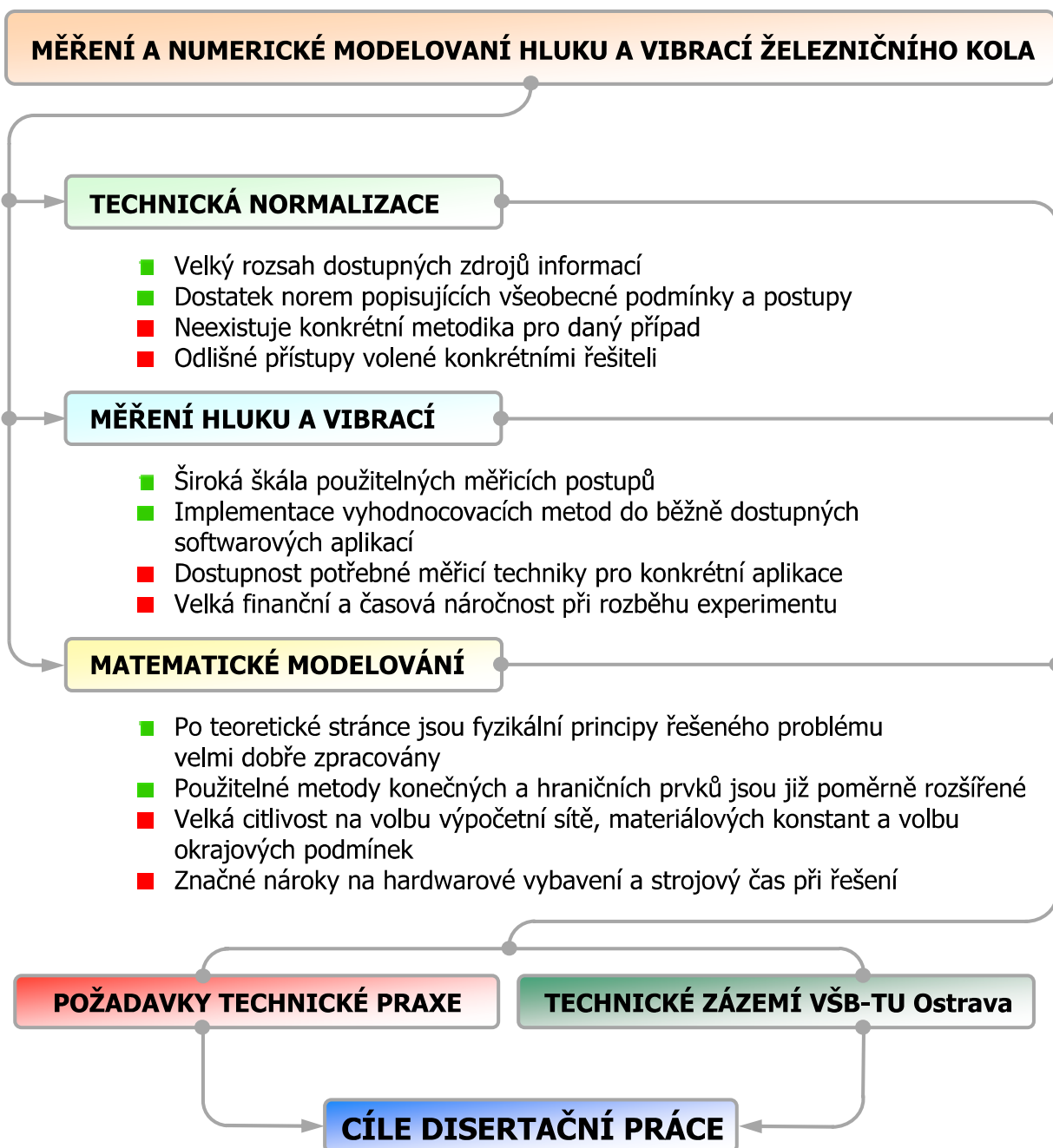
V následujícím textu jsou shrnuty závěry rešerše, která byla k tématu disertační práce zpracována, a z níž částečně vyplývají i cíle této disertační práce. Součástí příloh této práce je i stručný popis obsahu bibliografie, jenž byla při zpracování řešené problematiky použita. S ohledem na různorodost jednotlivých pramenů je možno dostupné zdroje informací rozdělit do tří základních částí. V první části je proveden popis dostupné normalizace pro řešenou problematiku. Následující část se zabývá publikacemi z oblasti měření hluku a vibrací. V poslední fázi jsou shrnuty dostupné zdroje informací pro matematické modelování řešeného problému. Závěry vyplývající z provedené rešerše pro výše jmenované oblasti dostupných zdrojů informací jsou následující.

Dostupná technická normalizace nabízí dostatek informací k provedení měření hluku či vibrací na téměř libovolných zdrojích. Její zpracování je však provedeno tak, že nabízí spíše obecná doporučení, která mnohdy dostatečně nepokryjí celou oblast řešeného problému a technik provádějící měření musí v některých případech volit cestu kompromisu. Tato skutečnost zcela nepochybně zhoršuje vzájemnou porovnatelnost výsledků měření od jednotlivých výrobců, kteří zpravidla volí cestu vnitřních specifikací, které popisují konkrétní zkoušky či testy. Lze tedy konstatovat, že zavedení jednotného postupu pro ověřování hluku železničních kol a jeho následná normalizace by zcela jednoznačně vedly ke zlepšení situace a sjednocení použitých postupů.

Naopak rešerše stavu poznání v oblasti měření hluku a vibrací prokázala, že v současné době známé měřicí metody jsou pro řešení daného problému více než dostatečné. Od detailních informací o dostupných snímačích kinematických i akustických veličin, přes podrobný popis měřicích a vyhodnocovacích přístrojů až k pokročilým metodám zpracování naměřených dat. Vývoj v této oblasti dospěl tak daleko, že pro řešení konkrétního problému je často možné použít i více měřicích technik či přístupů a potvrdit tak správnost získaných výsledků. Celé oblasti významným způsobem napomáhá i skutečnost, že algoritmy pro zpracování dat jsou čím dál tím častěji implementovány i do softwarových aplikací, které nejsou principiálně určeny pro měření dat, např. Matlab, MathCad, MS Excel apod., kde mohou být tato data po načtení z textového souboru pohodlně zpracována.

Velmi podobný trend sleduje i oblast matematického modelování hluku a vibrací mechanických struktur.

Poznání v této oblasti rovněž více než dostatečně pokrývá řešený problém a nástroje v podobě metody konečných prvků a metody hraničních prvků se jeví jako dostatečně vhodné. Z použité literatury navíc vyplývá, že ideální cestou by byla aplikace obou metod současně. Metoda konečných prvků se jeví jako ideální pro diskretizaci samotného železničního kola, hraničními prvky by pak bylo vhodné diskretizovat jeho okolí. Jediným omezením zde zůstává hardwarové vybavení a akceptovatelný strojový čas.



Obr.1: Schématické znázornění ideové formulace cílů disertační práce

### 3 Cíle disertační práce

S ohledem na výsledky provedené rešerše, a zejména pak ve vztahu k požadavkům zadavatele této disertační práce, je možné stanovit následující cíle disertační práce:

- 1) Provést kompletní návrh a realizaci technického experimentu, na jehož základě bude možné ověřit požadované dynamické a akustické vlastnosti železničního kola.
  - Při řešení problému využít dostupnou měřicí techniku a technické zázemí nabízené VŠB - TU Ostrava.
  - Provést návrh měřicího zařízení.
  - S ohledem na požadované výsledky provést experimentální modální analýzu a harmonickou analýzu železničního kola.
  - Provést akustická měření železničního kola, jejichž výsledkem budou hladiny akustických výkonů, vyzařené železničním kolem, pro různé varianty harmonického buzení.
  - Bude-li to možné, provést další alternativní akustická měření s cílem hlubšího poznání dané problematiky.
- 2) Ve spolupráci s výrobcem železničního kola sestavit matematický model a na základě výsledků provedených měření provést jeho odladění.
  - Sestavit numerický model železničního kola s dostatečnou vypovídací schopností, při zachování přiměřeného strojového času pro často se opakující výpočty.
  - Provést modální analýzu a harmonickou analýzu železničního kola s cílem sladit numerický model s jeho skutečným protějškem.
- 3) Vyhodnotit prováděná měření a stanovit další možnosti spolupráce při řešení úlohy snižování hlučnosti železničních kol.
  - Připravit metodiku posouzení účinnosti hlukového tlumiče železničního kola.
  - Výstupy akustických měření zpracovat do podoby, v níž budou porovnatelné s výsledky případné numerické simulace problému.



## 4 Přípravná část řešení

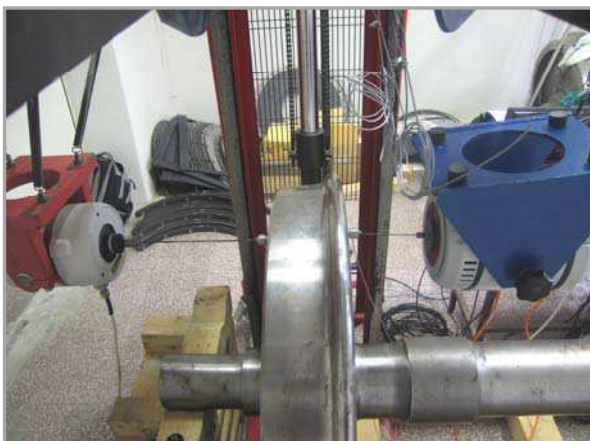
V této části práce je proveden základní rozbor řešeného problému. V úvodu kapitoly je stručně popsáno pozadí vzniku vzájemné spolupráce VŠB-TU Ostrava s Bonatrans Group, a.s. na řešeném projektu železničního kola. V následných kapitolách je proveden rozbor potřebných vlastností měřeného vzorku, dále jeho návrh a popis pracoviště, na kterém byla všechna měření na železničním kole provedena.

### 4.1 Spolupráce s Bonatrans Group, a.s.

Již řadu let spolupracují zaměstnanci VŠB-TU Ostrava a v neposlední řadě také její studenti na řešení nejrůznějších typů úloh se společností Bonatrans Group, a.s.. Ať už se jedná o diplomové práce nebo o zpracování konkrétních výzkumných úkolů, řešení se nikdy neobejde bez úzké spolupráce s technickou praxí.

Vlastní výrobní proces v Bonatrans Group a.s. zahrnuje jak výrobu surových náprav, kol a obručí z hutního polotovaru, tak jejich následné obrábění a montáž, včetně vývoje a produkce speciálních doplňků. Specializace na tento typ výrobku v Bonatrans Group a.s. má již mnohaletou tradici, a proto je zcela pochopitelné, že kromě samotné výroby je zde vynakládáno značné úsilí v oblasti výzkumu a vývoje. Nedílnou součástí této oblasti je v Bonatrans Group a.s. bezesporu zkušebnictví. Z pohledu firmy se neustále zvyšují nároky na užité vlastnosti produktů jako takových, což vede ke vzniku nových předpisů, norem a v neposlední řadě také požadavků samotných odběratelů na ověření nejrůznějších doplňkových vlastností. Typickým příkladem je vyšetřování dynamických vlastností, a to zejména s ohledem na vibrace a hluk.

Před zhruba čtyřmi lety se na VŠB-TU Ostrava podařilo vybudovat unikátní pracoviště zabývající se měřením hluku a vibrací. Poměrně rychle se podařilo navázat na letitou tradici vzájemně prospěšné spolupráce. Po několika schůzkách s vývojovými pracovníky společnosti Bonatrans Group a.s. bylo dohodnuto první orientační měření. Úkolem tohoto měření bylo subjektivní hodnocení vybuditelnosti železničního dvojkolí dynamickými budiči, které byly na Fakultě strojní VŠB-TU Ostrava k dispozici. Toto průvodní měření proběhlo v prostorách zkušebny společnosti Bonatrans Group a.s. na železničním dvojkolí, které bylo standardně používáno pro modální zkoušku pomocí kladívka pro různé varianty dynamických tlumičů.



Obr.2,a,b,c,d: Fotodokumentace průvodního měření vybuditelnosti železničního dvojkolí

Po prověření vybuditelnosti železničního dvojkolí na kmitočtech [22] dodaných zadavatelem (vlastní frekvence z rozsahu 200 Hz - 5000 Hz) byly stanoveny následující závěry.

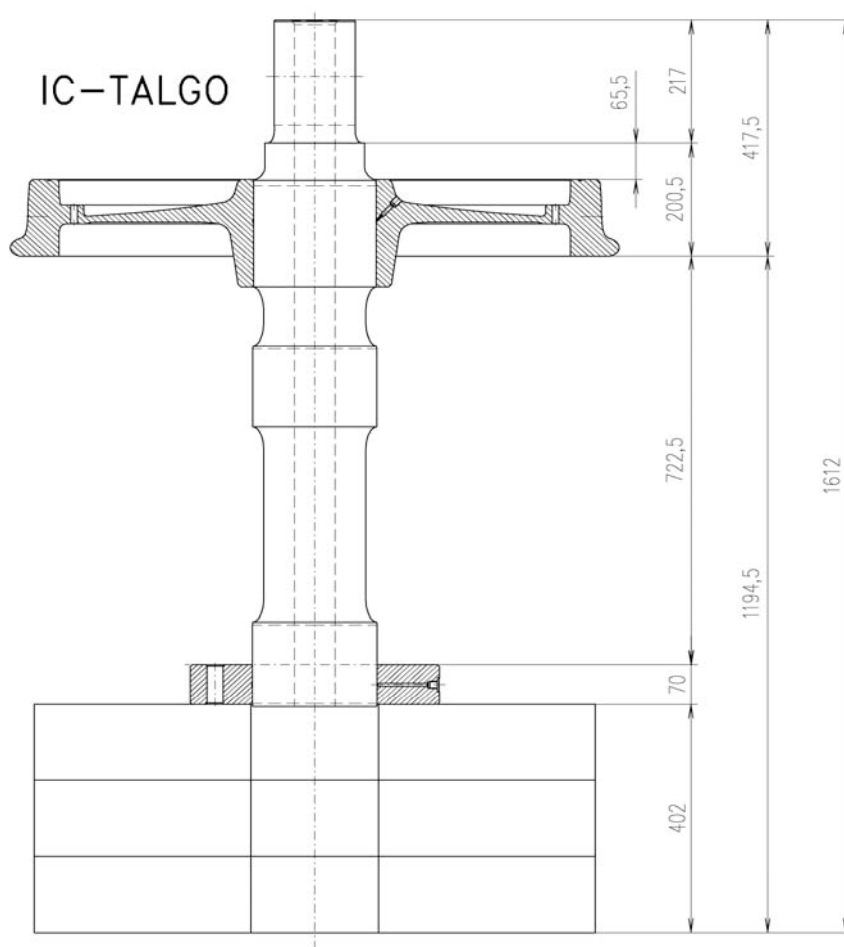
- Ve sledovaném frekvenčním rozsahu je pro vybuzení železničního kola dostatečný jeden dynamický budič.
- Použití obou budičů současně v protifázovém zapojení je rovněž možné a použitelné v celém sledovaném frekvenčním rozsahu, pro plánovaná akustická měření by však představovalo značné komplikace.
- Celkové uspořádání dvojkolí, systém uložení a jeho pozice v nosném rámu není s ohledem na místo kontaktu příliš vhodné ani pro vyšetřování dynamických vlastností.

Hlavním závěrem plynoucím z provedených zkoušek bylo rozhodnutí o návrhu a realizaci nového zařízení pro ověřování dynamických a akustických vlastností železničních kol.

## 4.2 Návrh testovacího zařízení a jeho realizace

Výsledná podoba testovacího zařízení pro ověřování dynamických a akustických vlastností železničního kola byla z velké části ovlivněna právě potřebou provádět akustická měření. Základní vlastnosti, které vzešly z požadavků na akustická měření, byly následující:

- Osa rotace měřeného železničního kola by měla být kolmá k rovině podlahy zkušební místnosti (bude zachována rotační symetrie úlohy a dále bude možné posoudit směrové chování železničního kola).
- Bezpodmínečně musí být zachován nalisovaný spoj náboje železničního kola na jeho osu (předpětí v okolí nalisovaného spoje zásadním způsobem ovlivňuje dynamické vlastnosti železničního kola [3],[9]).
- Takto vzniklý celek (železniční kolo s částí osy), by měl být připevněn k dostatečně hmotnému a tuhému základu.



Obr.3: Orientační výkres návrhu uložení železničního kola na zkušebním základu

Z předchozího obrázku je na první pohled zřejmé, že návrh i následná realizace byla provedena tak, aby bylo maximálně využito možností a zdrojů dostupných ve společnosti Bonatrans Group a.s.. Měřené kolo s částí osy bylo získáno z původního dvojkolí z obr.2.a,b,c, a to jeho rozříznutím na dvě poloviny, přičemž jedna z nich byla použita. Jak je dále patrné z obr.3, rozdělení osy bylo provedeno v místě středového osazení osy, na které byla dále s velkým přesahem nalisována upínací příruba opatřená osmi dírami. Takto vzniklý celek byl pomocí osmi šroubů M24 x 100 upevněn k ocelovému základovému bloku.

Ocelový základový blok, jehož úkolem je tvořit měřenému kolu reakční hmotu, byl zhotoven smontováním tří polotovarů pro výrobu železničních kol. Tyto byly navíc pro snadnější manipulaci rozříznuty na půlkruhové segmenty. Základ jako celek byl sešroubován celkem 12-ti kusy šroubů M30 x 310. Kompletní výkresová dokumentace celého zařízení je součástí příloh této disertační práce. V dalším textu je proveden stručný rozbor hmotových parametrů popisované sestavy.

POL.	NÁZEV - ROZMĚR	NORMA	MATERIÁL	POČET	HMOTNOST
1.	Kolo S-BAHN	ZB 39391/00	Ocel	1	319,7 kg
2.	Náprava S-BAHN 2		Ocel	1	247,7 kg
3.	Segment zákl. bloku		Ocel	6	354,2 kg
4.	Šroub M30 x 310	ČSN 021143	Ocel - 12.9	12	2,1 kg
5.	Šroub M24 x 100	ČSN 021143	Ocel - 8.8	8	0,5 kg

Tab.1: Hmotnosti jednotlivých prvků měřené sestavy

Rozdělení prvků sestavy do dvou základních skupin, umožnilo provedení jednoduché hmotnostní bilance mezi celkovou hmotou základové a měřené (buzené) části sestavy.

$$m_Z = 6 \cdot m_{(3)} + \frac{1}{2} m_{(2)} + 12 \cdot m_{(4)} + 8 \cdot m_{(5)} = \underline{2278,3kg} \quad (1)$$

$$m_M = m_{(1)} + \frac{1}{2} m_{(2)} = \underline{443,6kg} \quad (2)$$

Kde  $m_Z$  - představuje uvažovanou hmotnost základové části,  $m_M$  - je hmotnost měřené části a  $m_{(1,2,...,5)}$  - charakterizuje hmotnosti jednotlivých položek dle tab.1. Pak poměr mezi oběma hmotnostmi bude vycházet ze vztahu

$$r_m = \frac{m_Z}{m_M} = \underline{5,1}. \quad (3)$$

Přestože všeobecná doporučení pro podobné typy úloh uvádějí hodnotu ideálního hmotnostního poměru  $r_m \geq 10$ , byla navržená sestava ve výše popsaném uspořádání použita. Celkovou hmotnost zařízení  $m_C = 2721,9$  kg již nebylo možné s ohledem na dovolené zatížení podlahy zkušební místnosti dále navyšovat. Navíc bylo prokázáno, jak bude popsáno v dalších kapitolách, že hmotnost základového bloku je dostatečně vysoká na to, aby ve sledovaném kmitočtovém rozsahu neovlivnila dynamické chování zkoumaného železničního kola.

#### 4.3 Zkušební prostředí - polobezodrazová místnost pro akustická měření

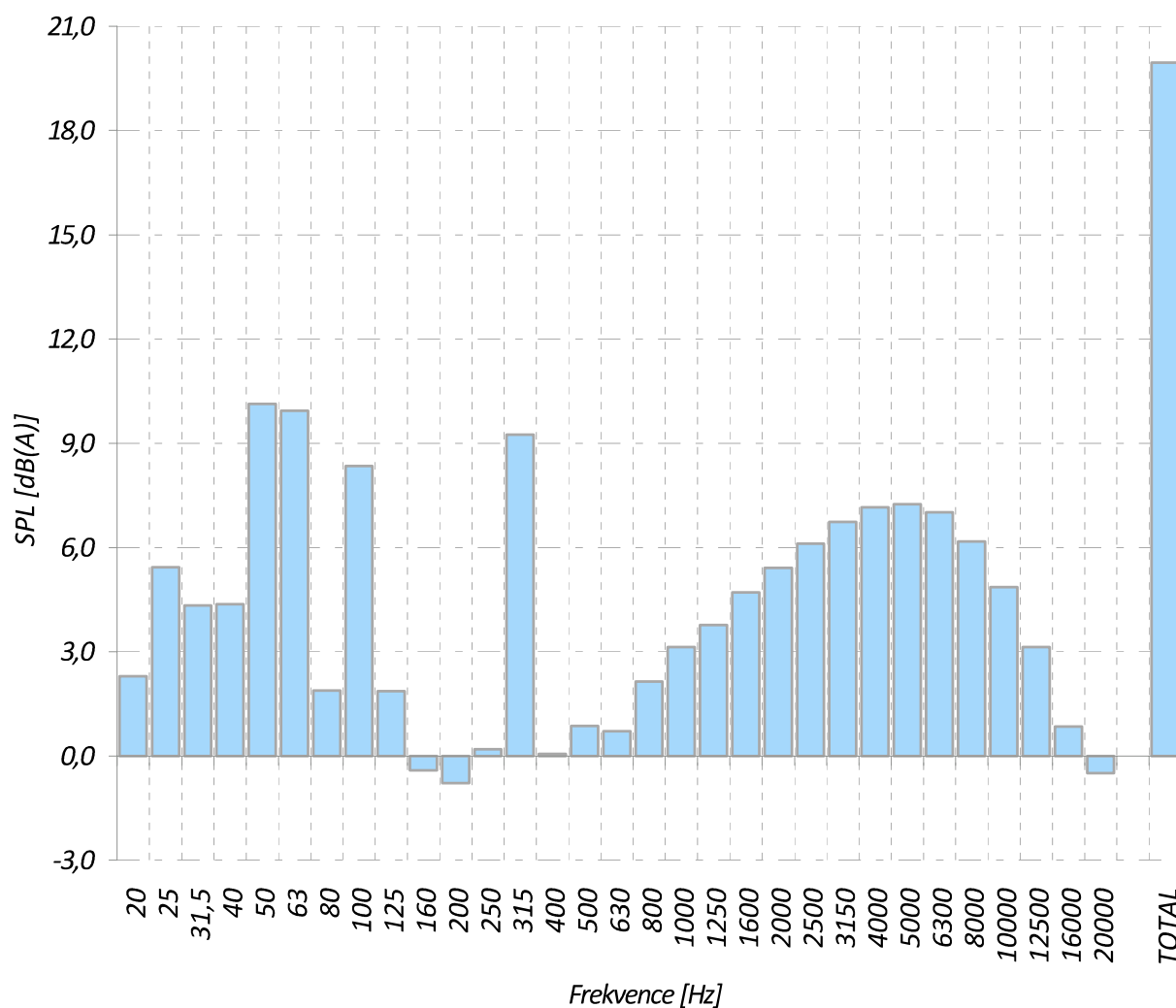
Jak již bylo zmíněno v předchozím textu, návrh měřené sestavy byl z velké části ovlivněn původním záměrem provést veškerá měření železničního kola uvnitř polobezodrazové místnosti VŠB-TU Ostrava. Polobezodrazová místnost VŠB-TU Ostrava byla zbudována ve druhém poschodí budovy nové menzy v prostorách bývalého společenského sálu. Efektu disipace akustické energie je zde dosaženo systémem speciálních absorpčních klínů, které jsou rozmístěny po všech zdech a stropě místnosti. Podlaha místnosti je naopak odrazivá, a pro tyto účely opatřena speciálním nátěrem. Půdorys polobezodrazové místnosti má po osazení absorpčními klíny rozměry 10,46 m x 9,06 m a světlá výška místnosti je 2,58 m. Tyto rozměry dávají čistý objem místnosti 244,5 m<sup>3</sup>. Absorpční klíny jsou vyrobeny z tvrzené zvláště pojené minerální vlny (Orsil-N) o měrné hmotnosti 100 kg/m<sup>3</sup>, a jsou opatřeny speciálním protiprašným náplekem. Rozměry klínů a náhled do prostoru polobezodrazové místnosti je možné vidět na následujících obrázcích.



Obr.4,a,b: Rozměry absorpčního klínu a pohled do polobezodrazové místnosti VŠB-TU Ostrava

Rozměry použitých absorpčních klínů byly odvozeny ze základních požadavků na polobezodrazovou místnost. V souladu s podmínkami popsány v [18] a [19] lze očekávat, že systém použitých absorpčních klínů bude uvnitř polobezodrazové místnosti účinně eliminovat odrazy akustických vln o kmitočtech, jenž mají takovou vlnovou délku, že její čtvrtina není větší, než činná délka absorpčního klínu. Stávající hloubka absorpčního obkladu měla být účinná pro hlacení akustických signálů s kmitočtem nad 100 Hz.

Na obr.5 je jako základní vlastnost polobezodrazové místnosti vyobrazeno i třetino-oktávové frekvenční spektrum hladiny akustického tlaku při běžném provozním režimu okolních laboratoří a vypnutých zdrojích hluku uvnitř místnosti (hluk pozadí). Při běžném denním režimu v budově nepřekročí celková hladina akustického tlaku hluku pozadí 20 dB(A). Na základě této skutečnosti je pracoviště pro zamýšlený účel vhodné.



Obr.5: Hladina akustického tlaku uvnitř polobezodrazové místnosti - hluk pozadí



Po zhodnocení všech okolností, byla schválena konečná podoba navrženého zařízení pro ověřování dynamických a akustických vlastností železničního kola a celá sestava byla zadána do výroby. Po zhruba tříměsíční lhůtě byla sestava přepravena na VŠB-TU Ostrava a poté smontována uvnitř polobezodrazové místnosti.



Obr.6,a,b: Železniční kolo s osou po přepravě na laboratoře a smontovaná sestava v polobezodrazové místnosti

Z obr.6,b také vyplývá, že byla mezi základový blok a podlahu polobezodrazové místnosti umístěna pryžová deska. Jejím úkolem bylo rovnoměrně rozložit hmotnost sestavy na plochu podlahy a dále zamezit jejímu poškození. Z obrázku je rovněž patrné, že měřená sestava není umístěna v geometrickém středu polobezodrazové místnosti, ale stojí poblíž jedné ze zdí. Důvodem tohoto opatření byla malá užitná zatížitelnost podlahy ve středu polobezodrazové místnosti (pouze  $200 \text{ kg/m}^2$ ), a proto byla měřená sestava osazena do jediného místa polobezodrazové místnosti, které je podepřeno pilířem vedoucím až do základů budovy. Jiné umístění železničního kola se základem by mělo s největší pravděpodobností fatální důsledky.

## 5 Experimentální modální analýza železničního kola

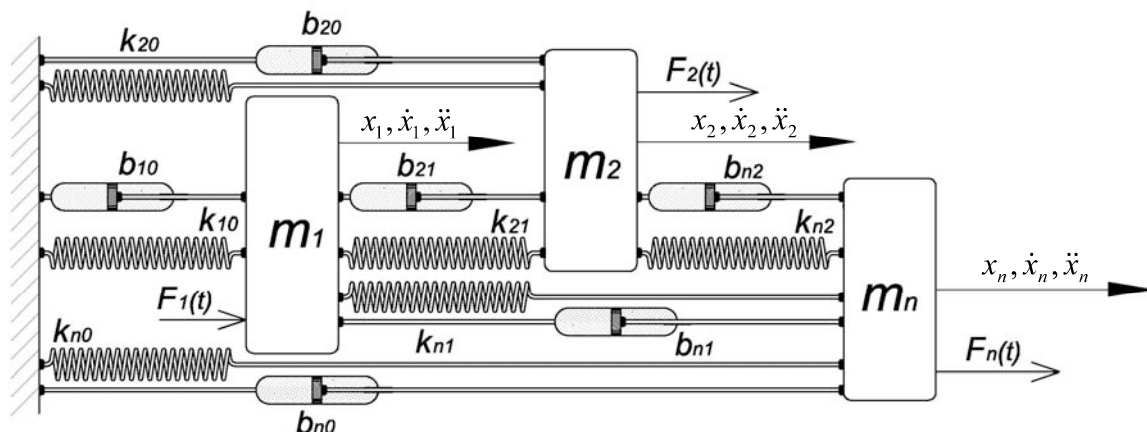
První prakticky realizovanou úlohou byla experimentální modální analýza železničního kola. Cílem experimentální modální analýzy bylo získat vlastní frekvence, vlastní tvary volného kmitání železničního kola v rozsahu od 200 Hz do 5000 Hz a v neposlední řadě hodnoty tlumení na jednotlivých vlastních tvarech kmitání. Frekvenční rozsah nebyl zvolen náhodně, ale vychází ze zkušeností výrobce. Jedná se o interval, v němž lze některé vlastní tvary kmitání považovat za akusticky významné [9]. Výsledky provedené experimentální modální analýzy byly dále použity při návrhu matematického modelu železničního kola pro numerický výpočet. V dalším textu jsou stručně popsány teoretické základy a všeobecné pojmy z oblasti modálních zkoušek.

### 5.1 Základní principy experimentální modální analýzy

Prvním krokem k úspěšnému řešení problému dynamických soustav je sestavení základních matic, které danou soustavu charakterizují. V případě teoretického řešení je sestavován tzv. fyzikální model systému. Fyzikální model, je pro dynamický systém s  $n$  stupni volnosti tvořen třemi maticemi řádu  $n \times n$ . Jedná se o matice hmotnosti, tlumení a tuhosti systému, které jsou až na několik speciálních případů symetrické. Na základě těchto matic je možno pomocí teoretické modální analýzy získat tzv. modální model systému, který je tvořen dvěma maticemi. První z nich, spektrální matice, je diagonální, přičemž hlavní diagonálu tvoří kvadráty vlastních kruhových frekvencí systému. Druhou matici modálního modelu tvoří po sloupcích uspořádané vlastní vektory systému a matice se nazývá modální. Posledním krokem teoretického řešení je tzv. odezvová analýza. Pomocí matic hmotnosti, tuhosti a tlumení sestavíme tzv. matici dynamických poddajností a při známém vektoru budících účinků je možné vyřešit odezvy na jednotlivých stupních volnosti.

Experimentální modální analýza vychází z inverzního postupu. Při prováděných měřeních jsou známy budící účinky a měřeny jsou odezvy na všech požadovaných stupních volnosti. Neznámou se v tomto případě stává matice dynamických poddajností (matice frekvenčních přenosů). Experimentální modální analýza tedy na základě známého buzení a zjištěné odezvy řeší problém dynamických vlastností systému, který představuje nalezení jeho modálního modelu. Na následujícím obrázku je příklad obecného dynamického systému s  $n$  stupni volnosti.



Obr.7: Model dynamického systému s  $n^\circ$  volnosti

Pohybovou rovnicí systému z obr.7 je možno zapsat v maticovém tvaru následovně:

$$[M] \cdot \{\ddot{x}\} + [B] \cdot \{\dot{x}\} + [K] \cdot \{x\} = \{f\} \quad (4)$$

Význam jednotlivých členů pohybové rovnice je následující:

- $[M]$  - matice hmotnosti
- $[B]$  - matice viskózního tlumení
- $[K]$  - matice tuhosti
- $\{x\}, \{\dot{x}\}, \{\ddot{x}\}$  - sloupcový vektor výchylek, rychlostí a zrychlení
- $\{f\}$  - sloupcový vektor budících účinků

Do pravé strany pohybové rovnice je dále vhodné za budící účinky dosadit harmonické síly v komplexním tvaru.

$$\{f\} = \{F_A\} \cdot e^{i\omega t} \quad (5)$$

- $\{F_A\}$  - sloupcový vektor komplexních amplitud budících účinků

Je zřejmé, že ustálená odezva řešeného systému na harmonické buzení bude rovněž harmonická.

$$\{x\} = \{X_A\} \cdot e^{i\omega t} \quad (6)$$

- $\{X_A\}$  - sloupcový vektor komplexních amplitud výchylek

Dosazením první a druhé derivace rovnice (6) do pohybové rovnice je možno tuto získat ve tvaru

$$\{X_A\} \cdot ([K] + i\omega[B] - \omega^2[M]) = \{F_A\}. \quad (7)$$

Pro další zpracování je vhodné zavést formální substituci ve tvaru

$$([K] + i\omega[B] - \omega^2[M])^{-1} = [H(i\omega)], \quad (8)$$

kde  $[H(i\omega)]$  - představuje tzv. matici frekvenčních přenosů a rovnici (7) je možno upravit do konečné podoby

$$\{X_A\} = [H(i\omega)] \cdot \{F_A\} \quad (9)$$

Podobně by bylo možné odvodit i matici frekvenčních přenosů pro případ hysterézního tlumení soustavy ve tvaru

$$([K] + i[D] - \omega^2[M])^{-1} = [H(i\omega)]. \quad (10)$$

Na každý z členů matice frekvenčních přenosů je možno nahlížet jako na podíl příslušné odezvy a vstupní síly. V závislosti na kinematické veličině, která je pro řešení úlohy použita, je nutno rozlišovat i různé typy frekvenčních přenosů.

- pokud je měřenou veličinou výchylka, hovoříme o tzv. receptanci  $H(i\omega)$
- pokud je měřenou veličinou rychlost, hovoříme o tzv. pohyblivosti  $Y(i\omega)$
- pokud je měřenou veličinou zrychlení, hovoříme o tzv. akceleranci  $A(i\omega)$

Stejně jako mezi základními kinematickými veličinami, i zde je možné integrací či derivací v časové oblasti matice frekvenčních přenosů přepočítávat.

$$A(i\omega) = i\omega \cdot Y(i\omega) = -\omega^2 \cdot H(i\omega) \quad (11)$$

Vyjádření konkrétního prvku matice frekvenčních přenosů z předchozích rovnic není pro konečné zpracování příliš praktické. Po sestavení modálního modelu systému lze dle [5], [8], příslušný frekvenční přenos najít mnohem snáz v následující podobě.

$$H_{jk}(i\omega) = \frac{X_{Aj}}{F_{Ak}} = \sum_{n=1}^q \frac{v_j^n \cdot v_k^n}{\lambda_n^2 - \omega^2} \quad (12)$$

Význam jednotlivých členů ve vyjádření frekvenčního přenosu v rovnici (12) na předchozí straně je následující.

- $\lambda_n$  - vlastní číslo n-tého vlastního tvaru (definice viz. následující rovnice (13))
- $v_j^n$  - j-tý prvek n-tého vlastního vektoru
- $q$  - celkový počet vlastních tvarů kmitání

Hlavní výhodou výše uvedené rovnice je možnost určení modálních vlastností systému z měřených frekvenčních přenosů. Z tohoto pohledu lze rovnici (12) považovat za základ modálních zkoušek. Poslední zjišťovanou vlastností systému je tlumení. Zápis tlumících vlastností systému je možno provést v několika formách, z nichž lze za nejběžnější považovat vyjádření prostřednictvím konstanty doznívání či poměrných útlumů. Postup výpočtu tlumení z naměřených dat je závislý na druhu předpokládaného typu tlumení. V tomto konkrétním případě byl uvažován pouze model viskózního tlumení, protože jej využívá SW balík *STAR* firmy *Spectral Dynamics*, který byl pro zpracování a vyhodnocení dat experimentální modální analýzy použit.

$$\lambda_n = -\delta_n \pm i\Omega_n = -\xi_n \cdot \Omega_{0n} \pm i\Omega_{0n} \cdot \sqrt{1 - \xi_n^2} \quad (13)$$

- $\Omega_n = \sqrt{\Omega_{0n}^2 - \delta_n^2}$  - vlastní kruhová frekvence (tlumená) n-tého vl. tvaru
- $\Omega_{0n}$  - vlastní kruhová frekvence (netlumená) n-tého vl. tvaru
- $\delta_n$  - konstanta doznívání n-tého vl. tvaru
- $\xi_n$  - poměrný útlum n-tého vl. tvaru

Samotný systém zpracování dat získaných při experimentální modální analýze bývá závislý na konkrétní SW aplikaci. Metody zpracování je však možné, s ohledem na princip, rozdělit do dvou skupin.

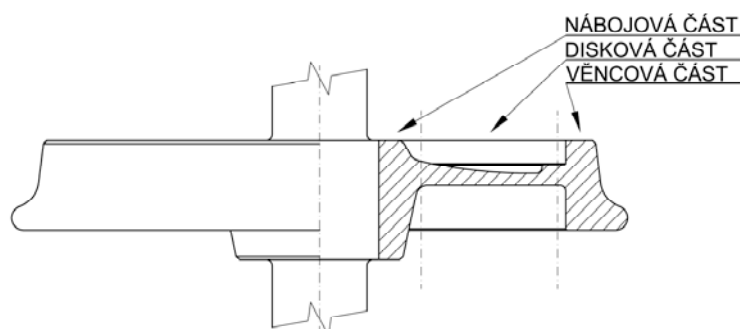
- *SDOF* - Tyto metody v okolí rezonanční frekvence aproximují skutečný systém systémem s 1° volnosti.
- *MDOF* - Při tomto systému řešení je do analýzy zahrnuto více rezonančních špiček, které jsou aproximovány systémem s více stupni volnosti.

## 5.2 Přípravná část měření

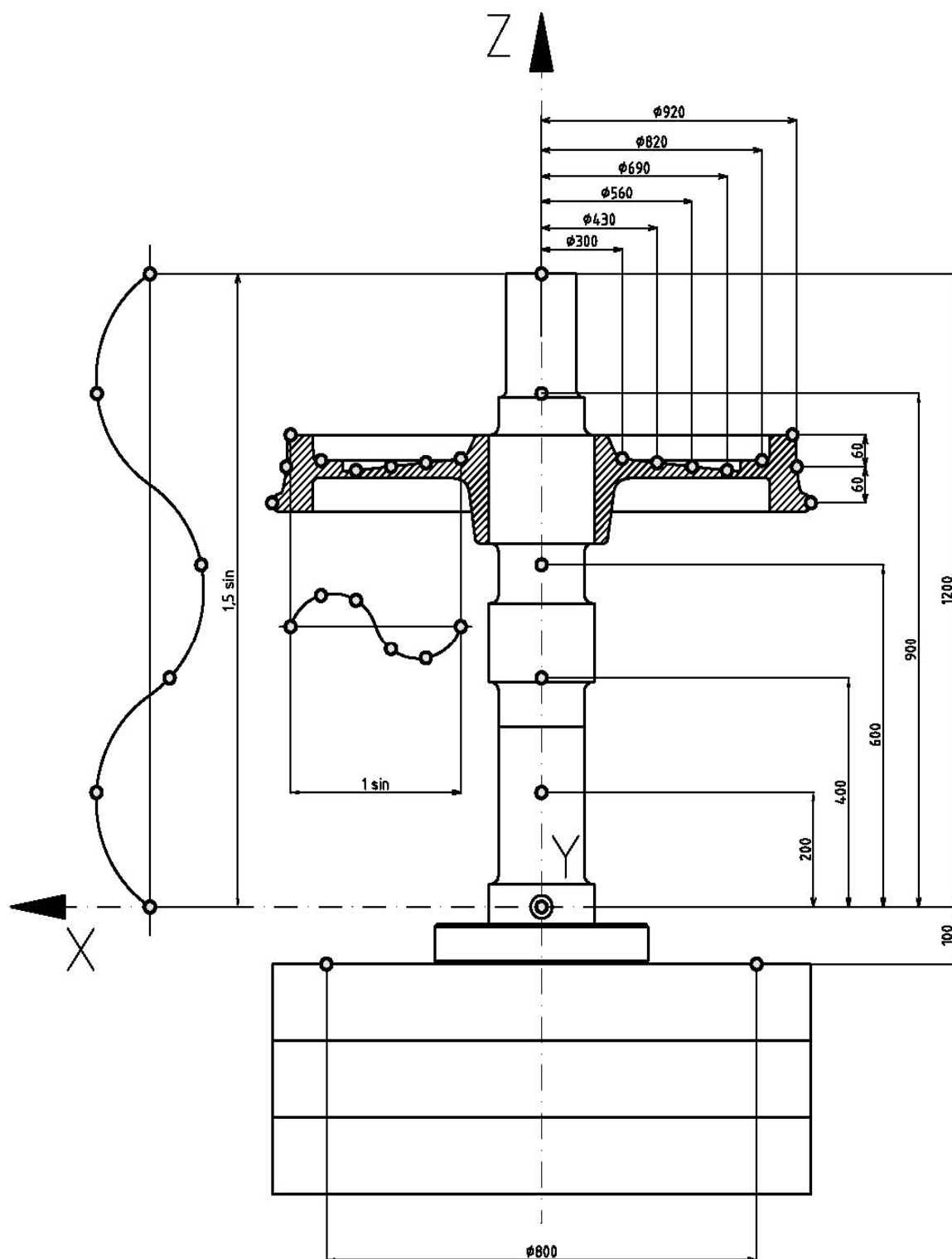
Pro vlastní realizaci experimentální modální analýzy byla použita metoda buzení pomocí modálního kladívka s jedním referenčním snímačem zrychlení v pevné pozici. Poměrně zásadní byla otázka volby hustoty měřicí sítě. Parametry měřicí sítě reflektují požadavky zadavatele a rovněž zkušenosti z předešlých měření. Dalším určujícím parametrem byla horní hranice požadovaného frekvenčního rozsahu 5000 Hz a podoba vlastních tvarů kmitání v blízkosti tohoto kmitočtu. Z pohledu předchozích doporučení by bylo ideální, aby počet bodů měřicí sítě byl co možná nejvyšší. Takováto úvaha by však vedla k neúměrnému prodloužení doby potřebné k měření a vysoké náročnosti při zpracování naměřených dat. Výslednou podobu měřicí sítě je možné, po uvážení všech možností, shrnout v následujících podmínkách:

- Disková část železničního kola byla po obvodu rozdělena s krokem  $15^\circ$ , což představovalo 24 měřicích bodů po obvodu zvolené dráhy.
- V diskové části kola bylo zvoleno celkem 5 kruhových měřicích drah.
- Na věncové části kola byly zvoleny další tři kruhové dráhy.
- Na ose kola bylo s ohledem na očekávanou podobu deformačních tvarů zvoleno celkem 6 měřicích bodů.
- Na svrchní ploše základu byla rovněž zvolena jedna kruhová dráha s úhlovým dělením  $30^\circ$ , aby bylo možné prokázat dostatečnou stabilitu použitého základu.
- Tímto způsobem bylo dosaženo celkového počtu 211 měřicích bodů.

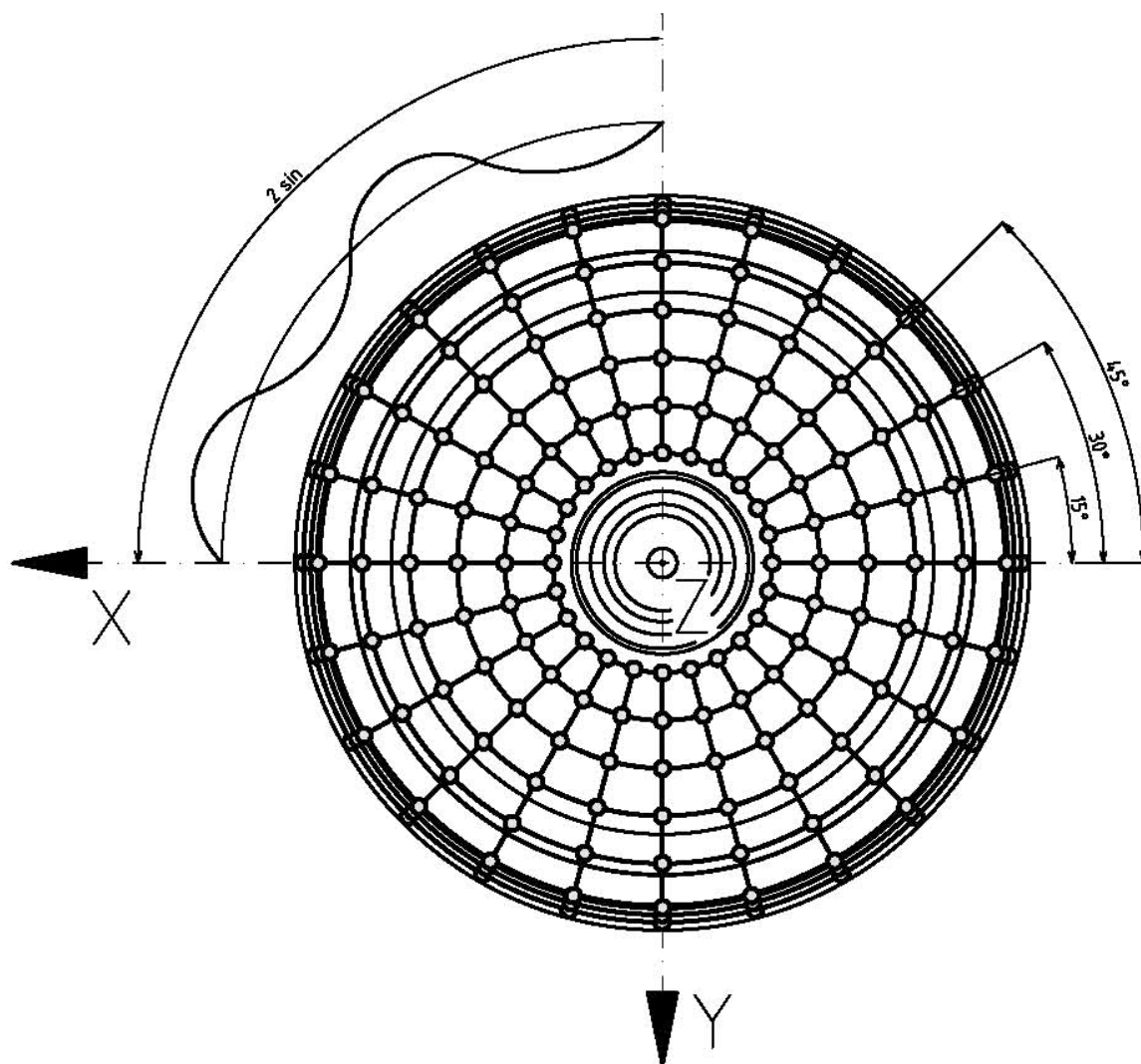
Při volbě měřicích drah bylo využito i klasifikace vlastních tvarů kmitání železničních kol, která je velmi podrobně provedena v [9]. Na dalším obrázku je pro přehled uvedena základní terminologie pro popis jednotlivých částí železničního kola.



Obr.8: Základní názvosloví topologie železničního kola



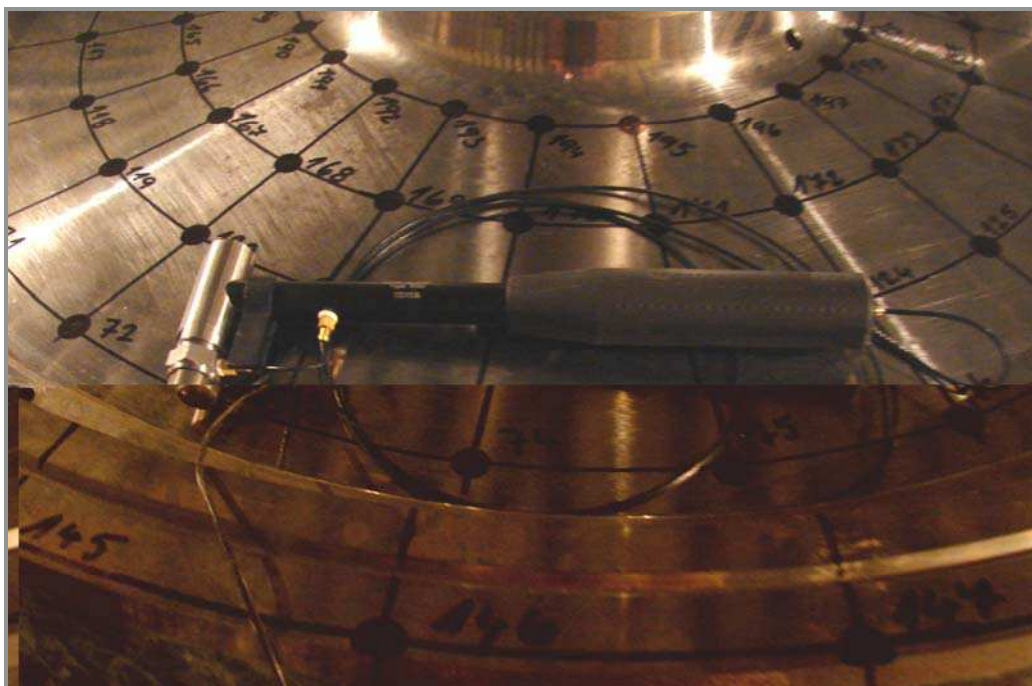
Obr.9: Rozměrové schéma rozložení měřicí sítě na měřené sestavě - nárys



Obr.10: Rozměrové schéma rozložení měřicí sítě na měřené sestavě - půdorys

Z předchozích obrázků (obr.9 a obr.10) je rovněž patrné, že byl měřenému objektu přiřazen pravoúhlý souřadný systém. Zvolený souřadný systém byl použit pro všechna prováděná měření a jsou k němu vztaženy i pozice bodů měřicí sítě. Následně byla měřicí síť přenesena i na měřenou sestavu železničního kola a základu. Jak ukazuje obr.11 na další straně, byla jednotlivým měřicím bodům přidělena pořadová čísla.

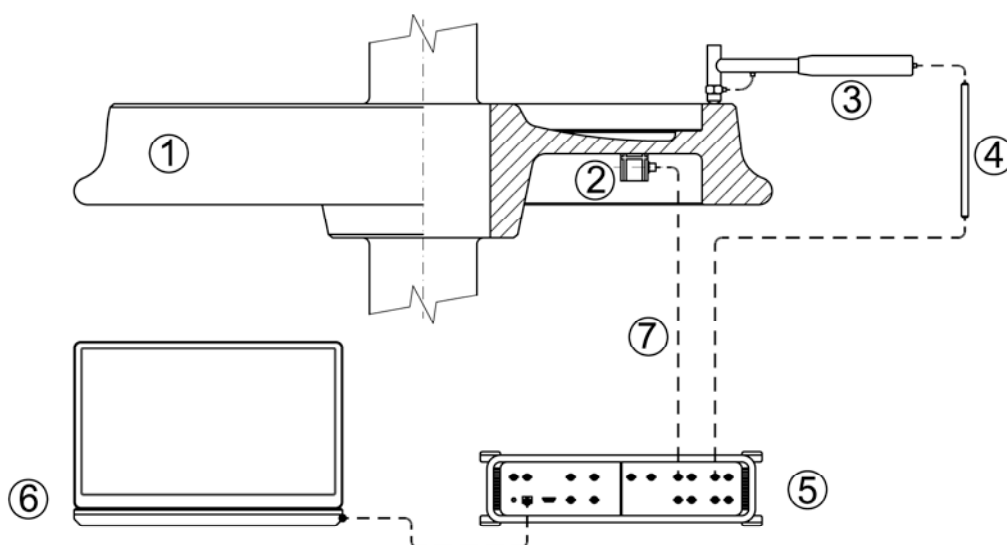
Zvolené rozložení měřicích bodů bylo použito i jako základ pro tvorbu geometrického modelu k vizualizaci výsledků experimentální modální analýzy. Podrobný popis geometrického modelu, včetně postupu při jeho sestavování, bude proveden v dalším textu.



Obr.11: Detailní pohled na část železničního kola s naznačenou sítí a modální kladívko

### 5.3 Použité měřicí přístroje

Rozsah použité měřicí techniky vycházel jednak z dostupného technického vybavení laboratoře katedry mechaniky VŠB - TU Ostrava a dále ze zvolené metodiky měření pomocí modálního kladívka jako zdroje budící síly a snímače zrychlení v referenčním bodě na železničním kole [1], [5]. K měření bylo využito čtyřkanálového analyzátoru *Bruel & Kjaer*.



Obr.12: Schématické znázornění sestavy - experimentální modální analýza

Na obr.12 je schématicky znázorněno měřené železniční kolo osazené snímačem zrychlení, dále rázové kladívko s příslušenstvím a zařízení pro zpracování a vizualizaci naměřených dat. Následuje výčet jednotlivých položek obrázku s typovým popisem (čísla v seznamu odpovídají číslování položek dle obr.12).

1. Měřená soustava železničního kola s osou a základem
2. Snímač zrychlení
  - B&K - Type 4507 B 001, DeltatTron Akcelerometr, jmenovitá citlivost 1,010 mV/ms<sup>-2</sup>, S/N 10171
3. Rázové kladívko
  - B&K - Type 8202, Modální kladívko se snímačem síly, jmenovitá citlivost 1,02 pC/N, kovový úderný hrot, S/N 1551936
4. Nábojový předzesilovač
  - B&K - Type 2647 A, Nábojový předzesilovač, S/N 2347603
5. Analyzátor
  - B&K - Type 3560C, univerzální vysokorychlostní analyzátor, S/N 2348762
  - B&K - Type 3109, 4/2 kanálový modul
  - B&K - Type 7533, modul síťového rozhraní
6. Notebook pro zpracování dat
  - Notebook Fujitsu Siemens, procesor Intel centrino duo, 2048 MB RAM
7. Signálové kabely
8. SW prostředky pro měření a zpracování dat
  - B&K - PULSE v.12.0.0, *Modal Test Consultant*
  - *The STAR System*, Spectral Dynamics Inc., Ver. 5.24.32
  - Microsoft Excel 2007
9. Ostatní pomůcky a příslušenství
  - Technický vosk k upevnění snímače zrychlení
  - Odmašťovací prostředky
  - Svinovací metr
  - Fotoaparát



## 5.4 Příprava projektu pro měření

Ve vazbě na dostupné softwarové prostředky byla úloha experimentální modální analýzy rozdělena na dvě části. Měření frekvenčních přenosových funkcí bylo provedeno pomocí platformy *PULSE* s následným zpracováním. Výpočet vlastních frekvencí a vizualizace vlastních tvarů kmitání byly provedeny v programu *STAR*. Postup tvorby geometrického modelu a měření samotné vycházelo z ideologie použitého SW produktu. Celý postup měření a zpracování v aplikaci *B&K PULSE LabShop - Modal Test Consultant*, je možno shrnout v následujících krocích:

1. Po kompletním zapojení měřicího řetězce byly nastaveny základní parametry použitých snímačů.
2. Byl sestaven geometrický model pro měření.
3. Jednotlivým bodům geometrického modelu byly přiřazeny potřebné stupně volnosti.
4. Byly sestaveny měřicí sekvence - postup měření přes jednotlivé body modelu.
5. Následovalo nastavení parametrů použité FFT analýzy.
6. Byly nastaveny váhové funkce budicího a odezvového signálu.
7. Bylo provedeno měření frekvenčních přenosových funkcí dle definovaného postupu.
8. Naměřené přenosové funkce byly vyexportovány do textových souborů.

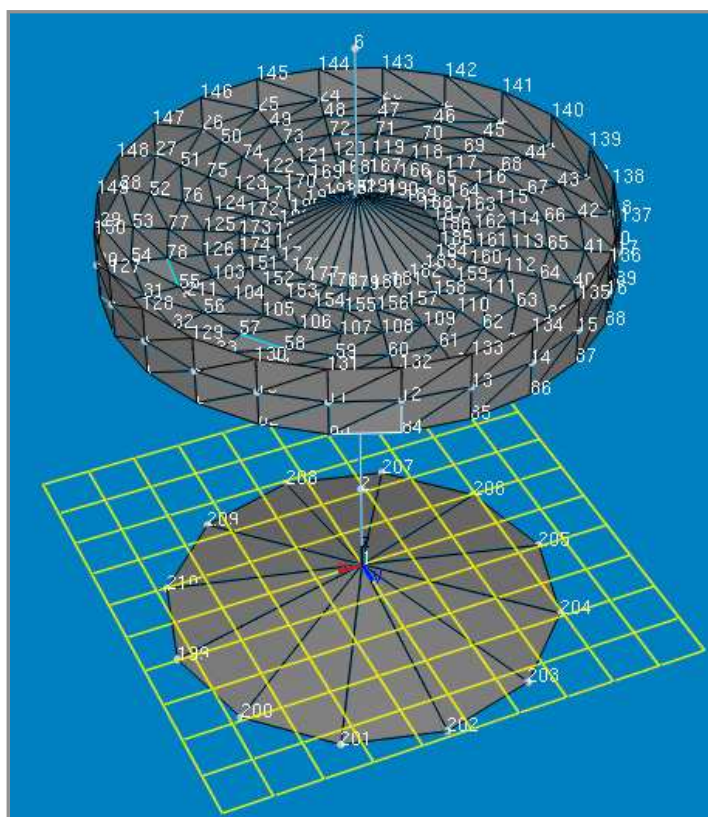
### 5.4.1 Nastavení připojeného HW

Po zapojení a oživení měřicí sestavy dle obr.12 bylo provedeno základní nastavení parametrů jednotlivých snímačů. Pro oba měřené signály (budicí síla a zrychlení) byl nastaven filtr horní propusti na frekvenci 7 Hz. Citlivost obou snímačů byla nastavena tak, aby byl při měření efektivně využíván AD převodník použitého frekvenčního analyzátoru a nedocházelo k jeho přebuzení nebo naopak nedostatečnému vybuzení. Správnost nastavení bylo možno ověřit cvičným úderem do měřeného kola, přičemž stejné intenzity bylo využito i v následných měřeních. Pro takto provedená nastavení byly oba použité kanály frekvenčního analyzátoru při zásahu budicím kladívkem vybuzeny na úroveň -10 dB pod maximální úroveň, což je dle [6] a [7] doporučená hodnota.

### 5.4.2 Tvorba geometrického modelu

Ke tvorbě geometrického modelu bylo využito jednoduché modelovací aplikace, kterou *Modal Test Consultant* nabízí. Měřené železniční kolo bylo vytvořeno z jednoduchých geometrických prvků, jejichž vrcholy tvoří body geometrického modelu. Polohy jednotlivých bodů modelu pochopitelně odpovídají pozicím měřicích bodů na skutečném kole a totožné jsou i počátky a orientace zvolených souřadných systémů:

- Osa kola je tvořena úsečkami mezi měřicími body 1,2,...,6.
- Náboj kola reprezentují dva proti sobě postavené rotační kužely s vrcholy v bodech 4 a 5 a podstavovými kružnicemi s body 175,176,...,198.
- Základový blok reprezentuje kružnice se středem v bodě 1 a body 199,200,...,210 po obvodu.
- Věncová část kola je tvořena nízkým válcem se třemi řadami bodů. Horní: 127,128,...,150, střední: 7,8,...,30 a dolní: 79,80,...,102.
- Disková část modelu železničního kola je tvořena mezikružím, které bylo vyplněno zbylými body z celkového počtu 211.

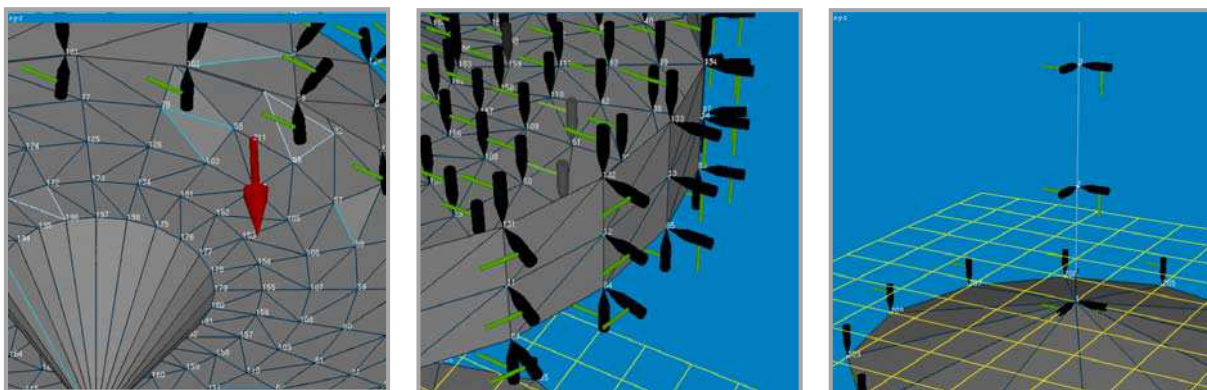


Obr.13: Geometrický model měřené soustavy železničního kola a základu

### 5.4.3 Definice potřebných stupňů volnosti

Definice stupňů volnosti v geometrickém modelu byla provedena zadáním směrů působení budících účinků v jednotlivých bodech. Jak již nepřímo vyplývá i z předchozího textu, byla pro tento typ úlohy zvolena varianta experimentální modální analýzy s pevně nainstalovaným snímačem zrychlení v referenčním bodě (211) a pohyblivým kladívkem. Buzení tedy bylo postupně aplikováno do všech měřených bodů kola a odezva byla měřena stále ve stejném místě.

Referenční bod (211) je i s nadefinovaným směrem odezvy zvýrazněný červenou šipkou na obr.14,a. Stejný směr byl přiřazen i většině bodů diskové části železničního kola a jeho základu (pohyb ve směru osy „z“). Každý bod osy železničního kola má však přiřazen dva stupně volnosti (buzení ve směru osy „x“ a „y“) a věncová část má směry buzení definované v polárních souřadnicích (buzení kolmé k plášti válce a rovnoběžně s osou). Situace je zřejmá z detailů na obr.14,b a 14,c.



Obr.14,a,b,c: Detailní pohledy na vybraná místa modelu s definovanými směry buzení

### 5.4.4 Měřicí sekvence

V této části tvorby projektu bylo určeno pořadí, ve kterém následně probíhalo měření v jednotlivých bodech. Postup představoval sestavení pořadové tabulky, v níž byly postupně vytvořeny páry budících a odezvových spekter s pořadovými číslicemi.

Z praktického hlediska se vytvoří tolik měřících sekvencí, kolik má daný geometrický model stupňů volnosti. V tomto případě bylo dosaženo konečného počtu 265 měřících cyklů na 211-ti měřících bodech (některým bylo přiřazeno více stupňů volnosti). Software automaticky sestavil sekvence tak, aby nebylo měření polohově chaotické a aby na sebe jednotlivé kroky spojitě navazovaly.

#### 5.4.5 Nastavení parametrů FFT analýzy

Nástrojem, který byl použit k získání základních frekvenčních spekter budicího signálu a odezvy byla FFT analýza. Vlastní nastavení vycházelo jednak z požadavku na frekvenční rozsah oblasti hledaných vlastních tvarů kmitání a dále byl klíčovým parametrem počet průměrů na každý měřicí bod. Po uvážení všech těchto skutečností byl FFT analyzátor v prostředí B&K Pulse nastaven následujícím způsobem:

– frekvenční rozsah analýzy	6400 Hz
– počet frekvenčních čar	6400
– frekvenční rozlišení	1 Hz
– typ průměrování	lineární
– počet průměrů	6

Spouštěcím podnětem pro nahrání časových vzorků signálů buzení a odezvy ke zpracování bylo překročení prahové úrovně na straně buzení.

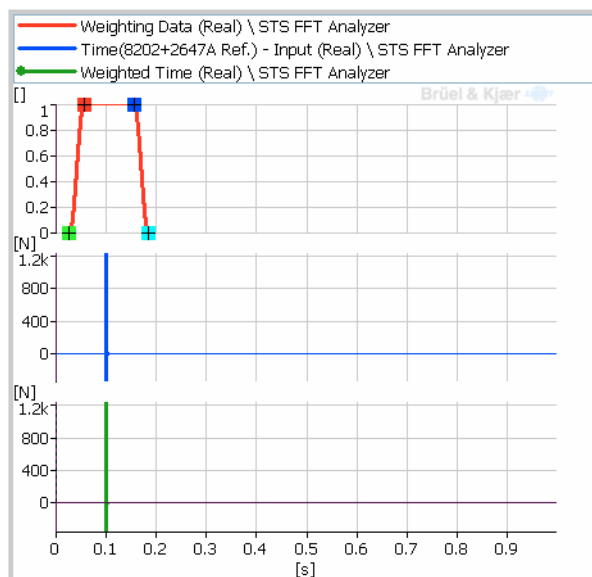
#### 5.4.6 Nastavení časových oken měřených signálů

Vážení signálu v časové oblasti přináší při „blokovém“ zpracování dat nesporné výhody. Jak plyne např. z [6], je velmi vhodné, aby byl časový vzorek konečné délky připravený pro FFT analýzu upraven váhovým filtrem. Význam filtru zpravidla spočívá v potlačení počátečních a koncových výkmitů signálu. Časový vzorek má pak na svém počátku a konci nulovou hodnotu a nedojde tak ke vzniku neexistujících frekvenčních složek, které by při skokové změně signálu v důsledku jeho „useknutí“ vznikly.

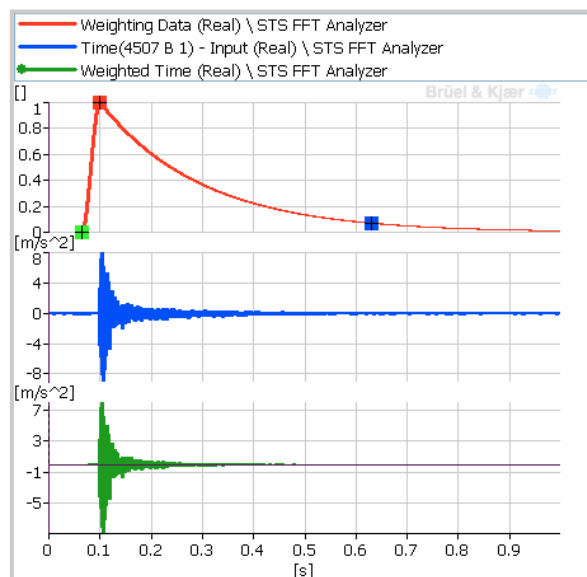
Konkrétní typy použitých časových oken vycházely z doporučení popsanych v [5]. Pro časové vážení budicího signálu z rázového kladívka bylo využito tzv. transientního váhového okna, které je velmi vhodné pro vážení signálů impulsního charakteru.

Pro vážení signálu odezvy bylo použito exponenciální časové okno, které svým průběhem částečně respektuje běžnou impulsní odezvu tlumených dynamických systémů. Ukázky obou použitých váhových oken jsou na následujících obrázcích obr.15 a obr.16.

Dále je na obr.17 zobrazeno použité nastavení prahu spuštění z náběžné hrany budicího signálu. Z obrázku je na první pohled zřejmé, že se jmenovitá úroveň špičky budicího signálu pohybovala v okolí 1000 N a práh spuštění byl nastaven na 200N.

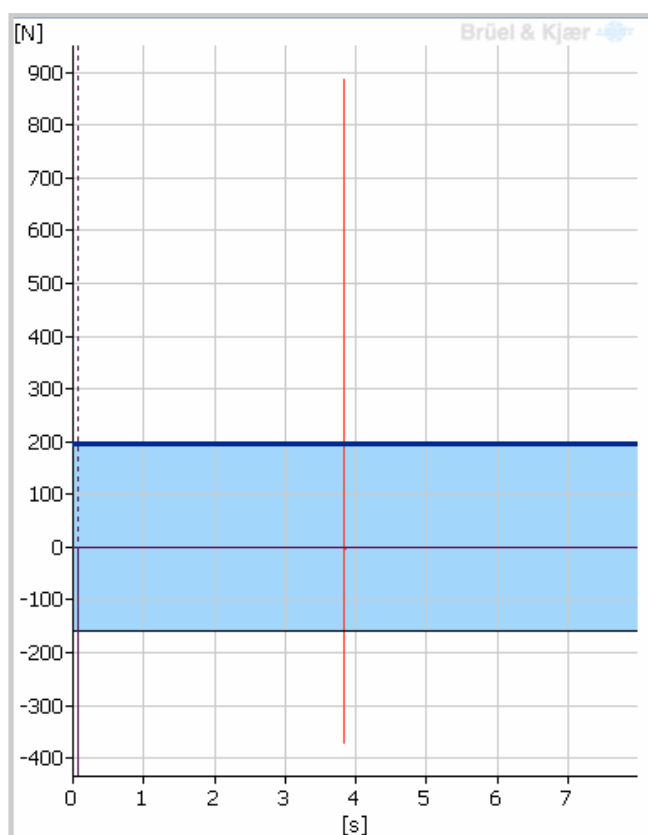


Obr.15: Časové vážení budicího signálu



Obr.16: Časové vážení odezvy

Na předchozích obrázcích je vždy červeně znázorněna poklesová charakteristika použitého filtru, následuje modrý průběh, který reprezentuje nevážený časový signál a konečně zelený průběh, znázorňující změřený časový vzorek po aplikaci zvolené váhy.



Obr.17: Nastavení prahu spuštění na vzorku budicího signálu

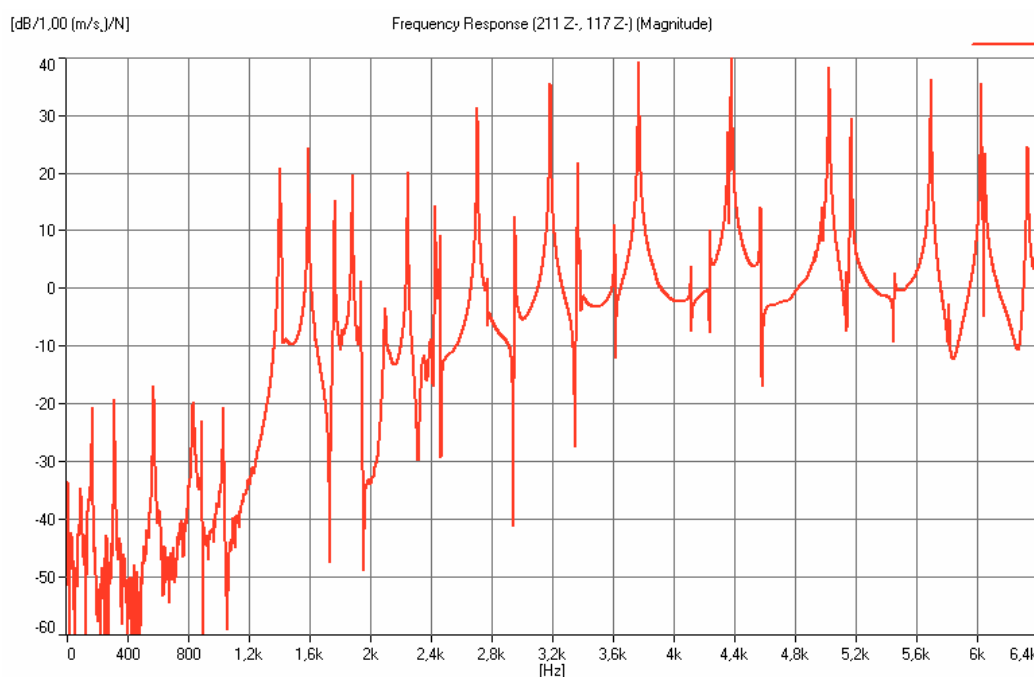
### 5.4.7 Měření frekvenčních přenosových funkcí a jejich export

Měření frekvenčních přenosových funkcí, resp. měření amplitudových a fázových přenosových spekter již bylo spíše rutinní záležitostí. Po výzvě softwaru bylo měřené železniční kolo v příslušném bodě a směru vybuzeáno úderem rázového kladívka a po jeho uklidnění následovaly další stejné údery až do dovršení zvoleného počtu průměrů. Takto bylo postupně provedeno všech 265 cyklů. Celkový čas potřebný ke změření všech bodů zvolených na železničním kole činil 36 pracovních hodin, a to zejména s ohledem na dlouhou dobu, která byla po každém úderu potřebná k zatlumení kola a jeho uvedení do klidového výchozího stavu pro nové měření.

Ve vazbě na topologii měřicího řetězce byl pro vyhodnocení zvolen typ frekvenčního přenosu  $H_I(f)$ , u kterého se předpokládá větší podíl šumové složky na výstupu měřicího řetězce [1],[5],[8]. Při použití dynamického budiče a širokopásmového vstupního signálu by tomu bylo přesně naopak.

$$H_I(f) = \frac{B(f)}{A(f)} \cdot \frac{A(f)}{A(f)} = \frac{CRS_{AB}(f)}{CRS_{AA}(f)} \quad (14)$$

V rovnici (14) je naznačen princip výpočtu frekvenčního přenosu  $H_I(f)$  ze změřených frekvenčních spekter vstupního ( $A(f)$ ) a výstupního ( $B(f)$ ) signálu, resp. z jejich vzájemných spekter  $CRS_{XX}(f)$ .

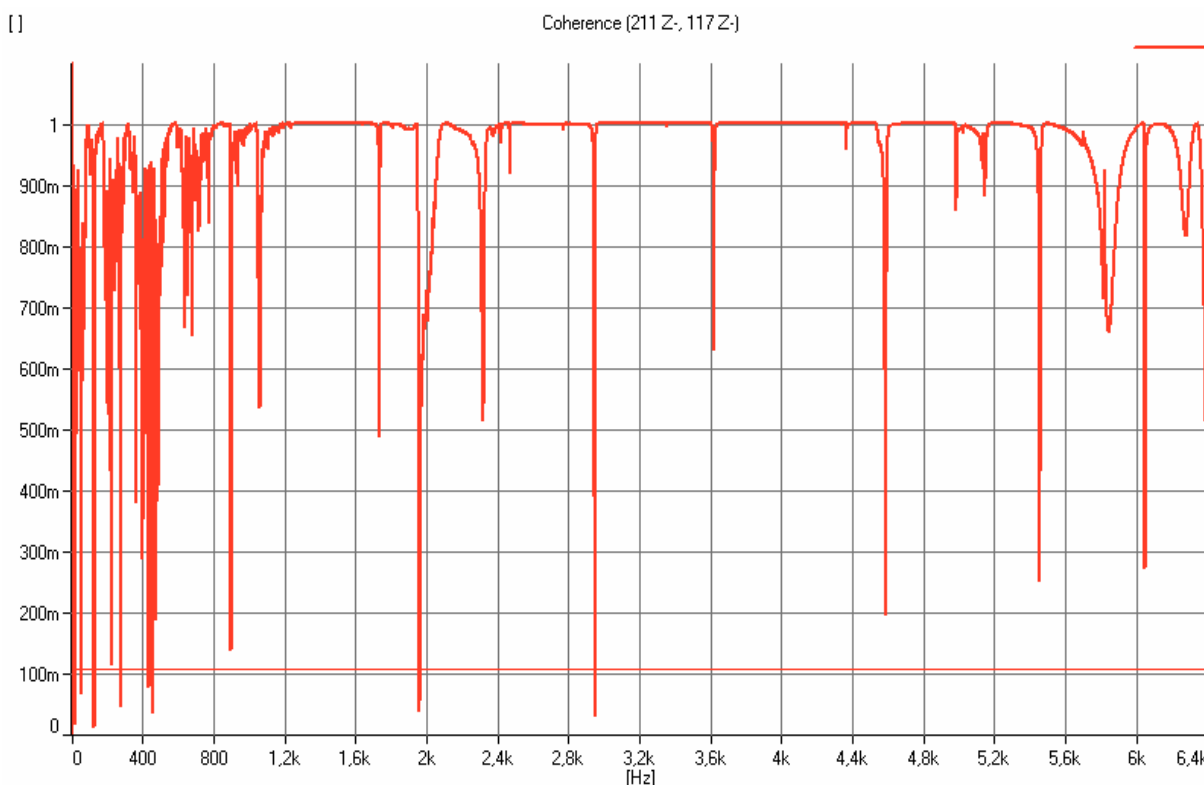


Obr.18: Ukázka změřeného frekvenčního přenosu  $H_I(f)$  pro náhodně vybraný pár bodů

Mimo amplitudová spektra frekvenčních přenosů byla ukládána i jejich fázová spektra, která byla pro následné vyhodnocení vlastních tvarů kmitání nepostradatelná. V průběhu celého měření byla rovněž sledována funkce koherence  $\gamma^2(f)$ , na jejímž základě bylo možné pro každý měřený pár bodů stanovit míru lineární závislosti mezi buzením a odezvou. Při použití výše použitého značení pro vzájemné spektrum  $CRS_{AB}(f)$  a autostpektrum  $CRS_{AA}(f)$ , lze funkci koherence definovat takto:

$$\gamma^2(f) = \frac{|CRS_{AB}(f)|^2}{CRS_{AA}(f) \cdot CRS_{BB}(f)} \quad (15)$$

Takto vypočtená funkce koherence nabývá ve sledovaném frekvenčním rozsahu hodnot od 0 do 1, přičemž v ideálním případě je jednotková. Ukázka vykreslené funkce koherence vypočtené pro totožný pár bodů (obr.18) je na následujícím obrázku.

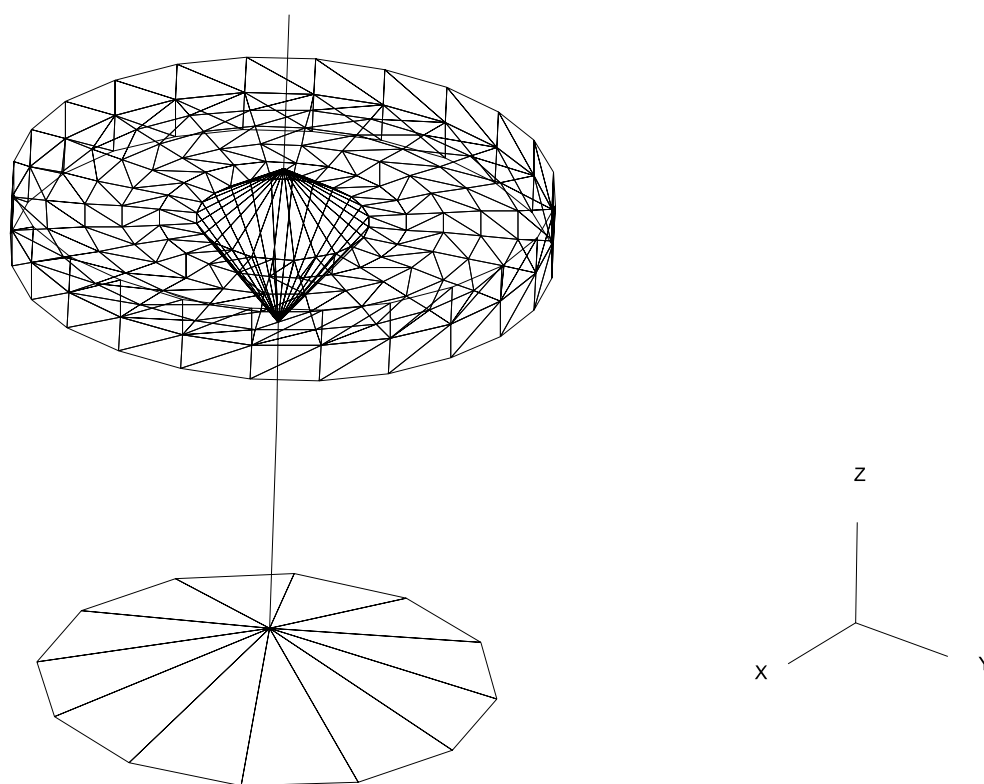


Obr.19: Ukázka funkce koherence  $\gamma^2(f)$  pro měřený pár bodů dle obr.18

Po odměření všech připravených párů měřicích bodů, byly naměřené přenosové funkce a geometrický model převedeny do textových souborů, které jsou součástí digitálních příloh této disertační práce. Podoba zápisu byla záměrně zvolena tak, aby je bylo možno načíst do aplikace *The STAR System*.

## 5.5 Zpracování naměřených přenosových funkcí

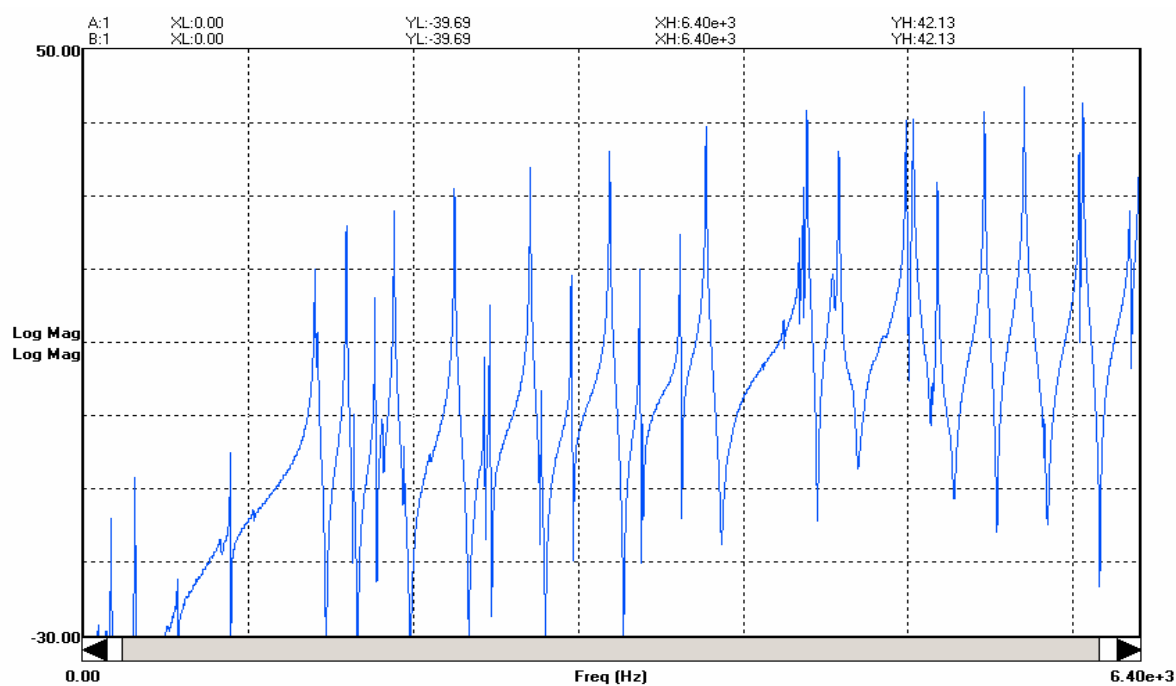
Jak již bylo předesláno v předchozích kapitolách, konečné zpracování získaných přenosových funkcí bylo provedeno v aplikaci *The STAR System*. Zpracování dat bylo rozděleno do několika kroků, které vycházely přímo z ideologie použitého SW balíčku. Prvním krokem bylo načtení geometrického modelu železničního kola, který byl pro tyto účely již dříve vyexportován z 3D modeláře aplikace *B&K PULSE*.



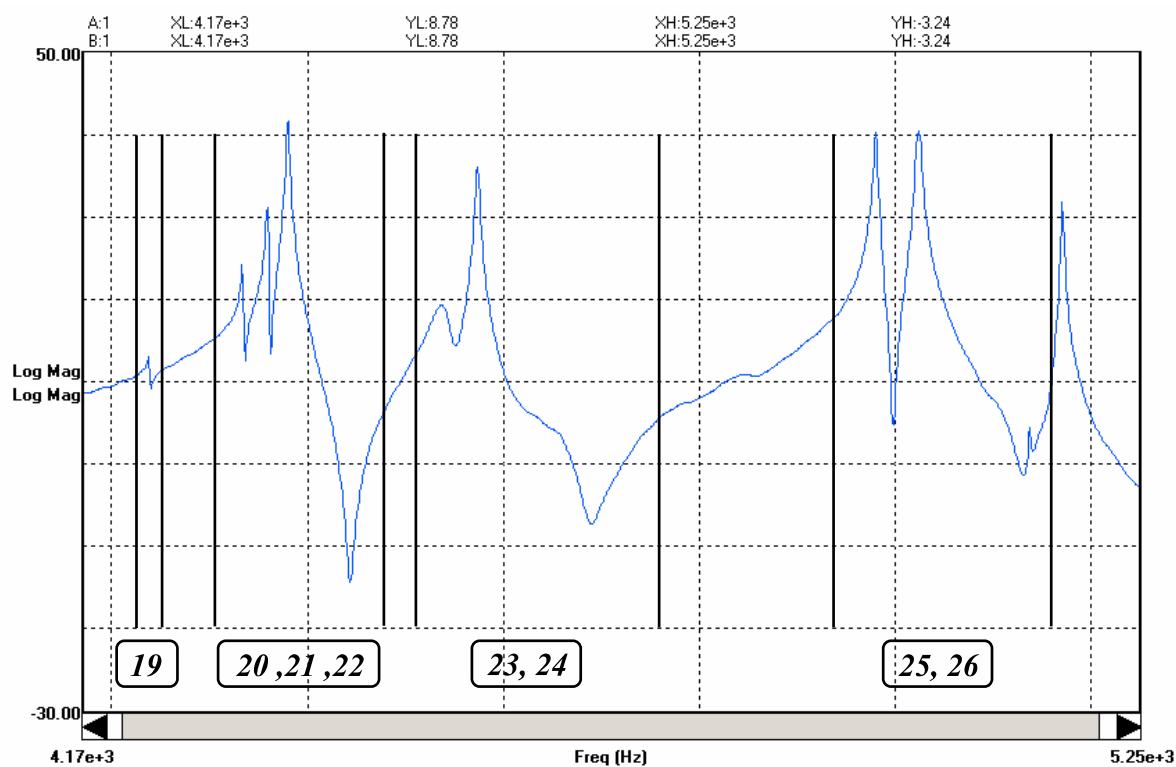
Obr.20: Geometrický model železničního kola zobrazený v aplikaci *The STAR System*

Dalším krokem bylo načtení všech změřených frekvenčních přenosových funkcí a jejich přiřazení jednotlivým bodům geometrického modelu. Obr. 21 na další straně znázorňuje amplitudové frekvenční spektrum získané v referenčním bodě měřeného železničního kola. Ke konečnému výpočtu hodnot vlastních frekvencí byla po manuálním návrhu pásem rezonancí použita globální metoda (obr. 22). K výpočtu doplňujících údajů byla použita metoda globálních residuí.





Obr.21: Frekvenční přenosová funkce v referenčním bodě měřeného železničního kola



Obr.22: Detailní pohled na frekvenční přenosovou funkci při výběru rezonančních pásem

Konkrétní číselné hodnoty vlastních frekvencí a poměrných útlumů vyšetřovaného železničního kola, byly zpracovány do tabulky 2. Vizualizace vlastních tvarů kmitání je pak provedena při závěrečném srovnání výsledků experimentální modální analýzy a modální analýzy provedené pomocí metody konečných prvků.

Číslo	Vlastní frekvence [Hz]	Šířka 3dB pásma pro výpočet tlumení [Hz]	Poměrný útlum [-]
1.	90,1	4,1	0,0463
2.	139,2	4,6	0,0331
3.	166,6	1,2	0,0069
4.	313,3	0,8	0,0028
5.	571,4	1,8	0,0051
6.	832,1	5,1	0,0064
7.	889,1	0,8	0,0013
8.	1400	2,2	0,0022
9.	1410	3,2	0,0019
10.	1590	1,2	0,0016
11.	1640	0,9	0,0005
12.	1760	1,0	0,0006
13.	1810	4,4	0,0024
14.	1880	1,4	0,0007
15.	1940	1,5	0,0007
16.	2100	5,9	0,0028
17.	2250	1,3	0,0006
18.	2430	1,1	0,0005
19.	2460	1,0	0,0003
20.	2700	1,3	0,0005
21.	2770	1,0	0,0003
22.	2950	1,1	0,0004
23.	3190	1,4	0,0004

24.	3370	1,0	0,0003
25.	3390	1,0	0,0003
26.	3610	1,1	0,0003
27.	3770	1,5	0,0004
28.	4110	1,0	0,0002
29.	4240	1,0	0,0003
30.	4330	1,0	0,0002
31.	4360	1,1	0,0002
32.	4380	1,5	0,0003
33.	4540	8,6	0,0019
34.	4570	1,9	0,0004
35.	4980	1,7	0,0003
36.	5020	1,4	0,0003

Tab.2: Číselné hodnoty výsledků experimentální modální analýzy

Dosavadním postupem bylo ve sledovaném frekvenčním pásmu zjištěno celkem 36 významných vlastních tvarů kmitání. Cílem dalších kroků této disertační práce bude mimo jiné vybrat z těchto vlastních tvarů kmitání ty, které jsou pro železniční kolo akusticky významné a dále zjistit, jakým způsobem ovlivní chování železničního kola na těchto vlastních tvarech kmitání osazené hlukové tlumiče.

## 6 Výpočtová modální analýza železničního kola

Řešení úlohy modální analýzy na matematickém modelu železničního kola mělo v tomto konkrétním případě hned několik důvodů. Prvním z nich byla možnost tímto způsobem získat přehlednou a srozumitelnou vizualizaci vlastních tvarů kmitání na geometrickém modelu železničního kola. Vlastní tvary kmitání získané modální analýzou matematického modelu významným způsobem přispěly k úspěšné klasifikaci vlastních tvarů kmitání z experimentální modální analýzy, která je provedena v závěru této kapitoly, kde jsou výsledky získané oběma odlišnými přístupy srovnány.

Druhým důvodem použití matematického modelování byla možnost případné aplikace jiných úloh při vyšetřování dalších vlastností zkoumaného železničního kola na již „odladěný“ model. S ohledem na skutečnosti popsané v [9] byla pro řešení úlohy modální analýzy na geometrickém modelu železničního kola zvolena metoda konečných prvků [10].

K řešení strukturálních úloh technické mechaniky je jak na katedře mechaniky VŠB - TU Ostrava, tak ve společnosti Bonatrans Group a.s., intenzivně využíván program Ansys, kterého bylo využito i v tomto případě.

### 6.1 Příprava matematického modelu pro řešení úlohy

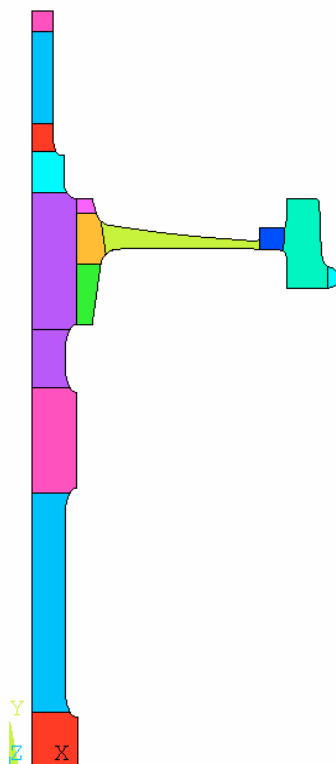
Je zřejmé, že i v této části řešení byl základním prvkem vhodně připravený geometrický model železničního kola. Tento byl v prostředí programu Ansys zhotoven poměrně snadno. I zde však bylo nutné neopomenout skutečnosti, které by mohly mít na chování matematického modelu zásadní vliv.

Prvním krokem byla tvorba základního průřezového profilu železničního kola a jeho osy dle výkresové dokumentace dodané výrobcem. Výkresová dokumentace je součástí příloh této disertační práce. Z obr.23 je na první pohled patrné, že globální souřadný systém celé úlohy byl zvolen stejně jako tomu bylo v případě experimentální modální analýzy. Profil kola a jeho osy byl záměrně vytvořen z několika jednodušších ploch, co bylo užitečné zejména při následné tvorbě sítě na geometrickém modelu. Na obrázku jsou jednotlivé plochy vyznačeny různými barvami. Do geometrického modelu byly zaneseny i drobnější tvarové detaily jako sražení či zaoblení hran, přesné křivky profilů disku kola a věnce. Po dohodě se zadavatelem byly vypuštěny pouze montážní otvory k uchycení hlukových tlumičů, které svými rozměry a polohou nemohou dynamické chování železničního kola v pozorovatelné míře ovlivnit.

1  
AREAS  
AREA NUM

ANSYS

JUL 11 2012  
09:21:17

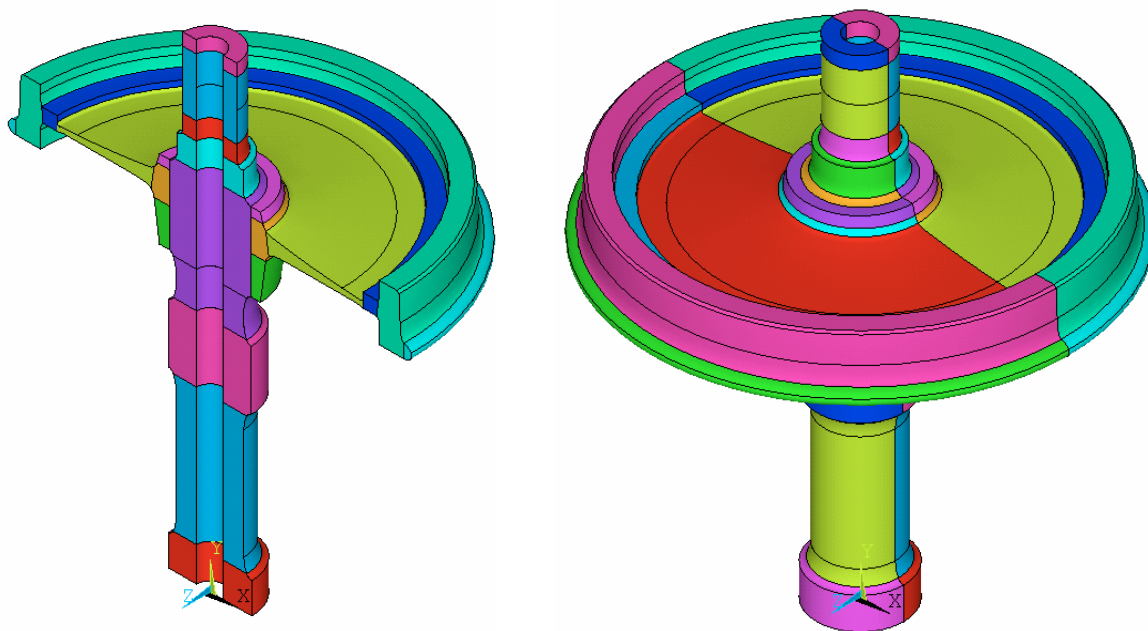


Obr.23: Základní profil železničního kola a jeho osy vytvořený pomocí ploch

1  
VOLUMES

ANSYS

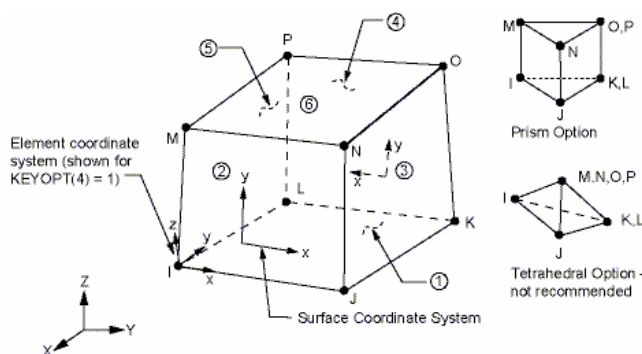
JUL 11 2012  
09:57:22



Obr.24: Prostorový geometrický model železničního kola, vlevo 180° výseč, vpravo kompletní model

Dalším krokem, jak ukazuje obr.24, bylo vytvoření prostorového geometrického modelu. Základním nástrojem byla možnost rotování profilových ploch okolo souřadné osy „y“. Z obrázku je patrné, že základní profil byl v první fázi rotován pouze v rozsahu  $180^\circ$  a druhá polovina kola a osy byla získána zrcadlením první části. Tento na první pohled komplikovaný postup umožnil zachovat v ose rotace soustavu železničního kola a jeho osy dělicí rovinu, která byla velmi užitečná zejména při vizualizaci získaných výsledků a klasifikaci vlastních tvarů kmitání. Po odstranění duplexních prvků geometrického modelu a závěrečném přečíslování byl geometrický model železničního kola dokončen.

Následovala volba vhodného typu konečného prvku, definice potřebných parametrů a materiálových konstant. Při snaze maximálně zjednodušit matematický model železničního kola byl nakonec zvolen prvek bez meziuzlů, tedy takový, který má uzlové body pouze ve svých vrcholech. Otázka vhodného typu konečného prvku byla diskutována v [10], odkud vyplynulo, že prvek „*SOLID 45*“ je vhodným kompromisem mezi spolehlivostí dosažených výsledků a časem potřebným k řešení úlohy.



Obr.25: Popis geometrie konečného prvku „*SOLID 45*“ převzatý z programu Ansys

Zvolený typ konečného prvku má v základní podobě osm uzlů, z nichž každý má celkem tři stupně volnosti, které odpovídají uzlovým posuvům ve směru souřadných os  $x$ ,  $y$  a  $z$ . Při tvorbě konečnoprvkového modelu byl kladen velký důraz na to, aby v důsledku nevhodného rozvržení sítě nedocházelo k degradaci konečných prvků do nevýhodné čtyřstěnné podoby.

Před generací sítě byly ještě nadefinovány dvě skupiny materiálových vlastností s označením „*R1*“ a „*R2*“ (*Real Constant Set*). Obě skupiny obsahovaly měrnou hmotnost materiálu, Youngův modul pružnosti a Poissonův poměr. Jedna skupina materiálových vlastností byla při generaci sítě přiřazena železničnímu kolu, druhá pak jeho ose.

Přestože byly při prvním výpočtu obě skupiny vlastností stejné, byla tímto způsobem zachována možnost drobnými změnami definovaných parametrů měnit dynamické chování matematického modelu při případném ladění vlastních frekvencí na naměřené hodnoty.

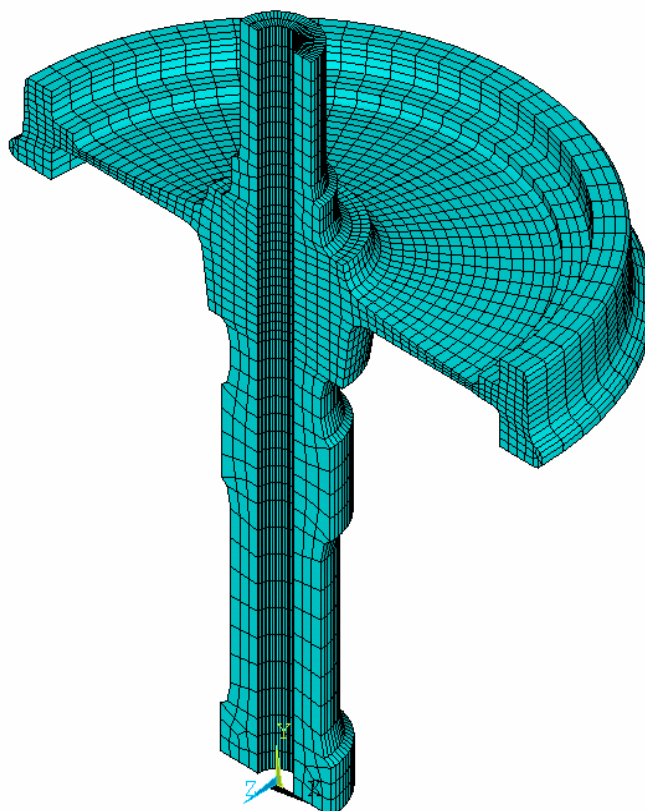
Materiálové vlastnosti	Výpis hodnot pro jednotlivé části modelu	
	„ R1 “ - Kolo	„ R2 “ - Osa kola
Měrná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	7810	7800
Youngův modul pružnosti [MPa]	212300	208700
Poissonův poměr [-]	0.3	0.3

Tab.3: Výpis použitých materiálových konstant

K vytvoření výpočtové sítě bylo využito mapované síťování, při charakteristické délce hrany konečného prvku cca 15 mm. Při generaci sítě bylo rovněž využito rotační symetrie celé úlohy. Na následujícím obrázku je zobrazen řez výpočtovým modelem železničního kola po vygenerování sítě konečných prvků.

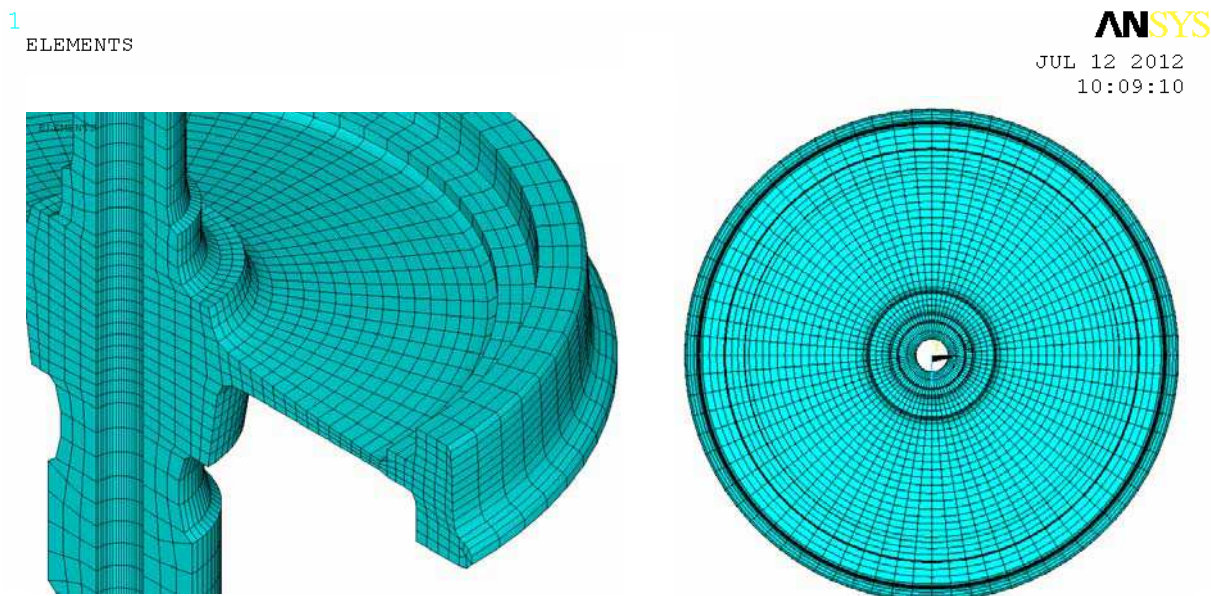
1  
ELEMENTS

**ANSYS**  
JUL 12 2012  
10:06:36



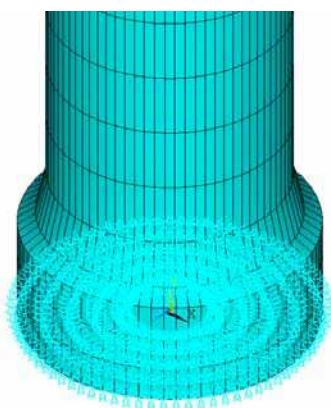
Obr.26: Řez výpočtovým modelem železničního kola a jeho osy

Matematický model, který je z jedné poloviny zobrazen na předchozí straně, byl tvořen celkem 21280-ti konečnými prvky výše jmenovaného typu, definovanými mezi 27968-mi uzlovými body.



Obr.27: Detailní pohled na síť věnce a disku, půdorys železničního kola

Posledním krokem před spuštěním výpočtu byla definice okrajových podmínek. Protože se metodou experimentální modální analýzy podařilo prokázat, že se ve sledovaném frekvenčním rozsahu použitý základ chová jako tuhé těleso, byla v matematickém modelu vazba s tímto základem nahrazena vetknutím dolní části osy kola.



Obr.28: Osa železničního kola s aplikovanými okrajovými podmínkami

Vetknutí bylo vyřešeno tak, že byly pomocí vazeb odebrány uzlům ležícím na dolní čelní ploše osy železničního kola všechny tři stupně volnosti.



## 6.2 Vlastní výpočet

K řešení maticové rovnice vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitání bylo využito Block Lanczosovy metody, která se pro hledání vlastních čísel řídkých symetrických matic u lineárních úloh hojně využívá. Úloha měla před spuštěním výpočtu takovýto charakter:

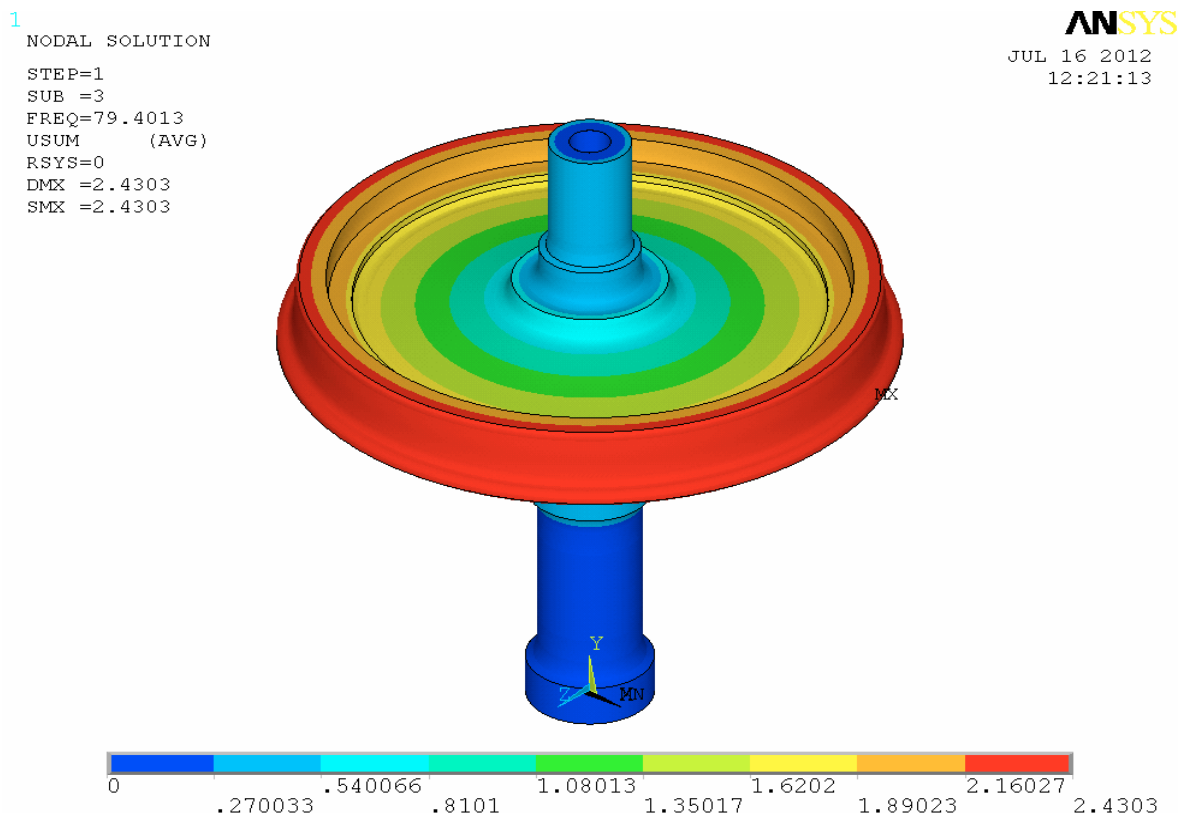
- Řád úlohy (počet stupňů volnosti) 82764 rovnic.
- Uvažovaný frekvenční rozsah 0 - 6400 Hz.
- Maximální počet vyřešených vl. frekvencí 100.

Po vyřešení úlohy již bylo možné zobrazit získané vlastní frekvence a provést vizualizaci vlastních tvarů kmitání. Čas potřebný pro výpočet nepřesáhnul na stolním počítači dobu jedné minuty. Tato skutečnost rovněž předurčuje sestavený matematický model k často se opakujícím optimalizačním výpočtům. Následuje zkrácený výpis zjištěných vlastních frekvencí.

SET	FREQ [Hz]	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	54.730	1	1	1
2	54.730	1	2	2
3	79.401	1	3	3
4	128.85	1	4	4
5	128.85	1	5	5
6	174.31	1	6	6
7	315.03	1	7	7
8	315.03	1	8	8
9	679.56	1	9	9
10	679.56	1	10	10
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
91	5463.3	1	91	91
92	5463.3	1	92	92
93	5540.1	1	93	93
94	5546.2	1	94	94
95	5546.2	1	95	95
96	5806.7	1	96	96
97	5806.7	1	97	97
98	5952.4	1	98	98
99	5952.4	1	99	99
100	6051.6	1	100	100

## 7 Vizualizace vlastních tvarů kmitání

Posledním krokem, v části zabývající se modální analýzou, bylo vyhodnocení vlastních tvarů kmitání měřeného železničního kola. Vyhodnocení spočívalo v přiřazení vlastních tvarů kmitání získaných experimentální modální analýzou graficky srozumitelnějším vlastním tvarům kmitání z matematického modelu. Výsledky jsou zpracovány do tabulek, které jsou s ohledem na rozsah součástí příloh této práce. V kapitole 6 zabývající se řešením na matematickém modelu bylo ve sledovaném frekvenčním rozsahu na první pohled nalezeno mnohem více vlastních tvarů kmitání než při provedené experimentální modální analýze. Vyloučením torzních vlastních tvarů kmitání, které jsou z pohledu akustiky nevýznamné a s ohledem na metodiku měření nemohly být zachyceny, se počet vlastních tvarů redukuje. K dalšímu zredukování počtu vlastních tvarů kmitání vede vypuštění duálních vlastních tvarů kmitání, které pramení z rotační symetrie úlohy [10]. V konečném důsledku pak byly počty vlastních tvarů kmitání z experimentu a výpočtu shodné a všechny vlastní tvary kmitání mohly být spolehlivě vyhodnoceny. Součástí digitálních příloh této disertační práce jsou i animace vlastních tvarů kmitání vyhodnocené pro jednotlivé vlastní frekvence.



Obr.29: Příklad vypuštěného torzního vlastního tvaru osy železničního kola

Frekvence vlastního tvaru kmitání zjištěná měřením:

313,3 Hz

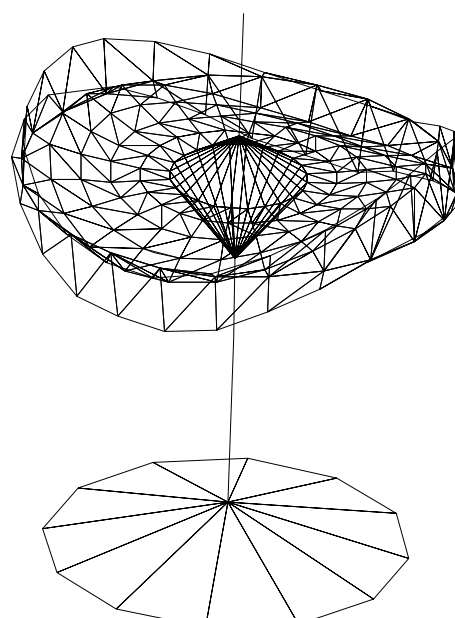
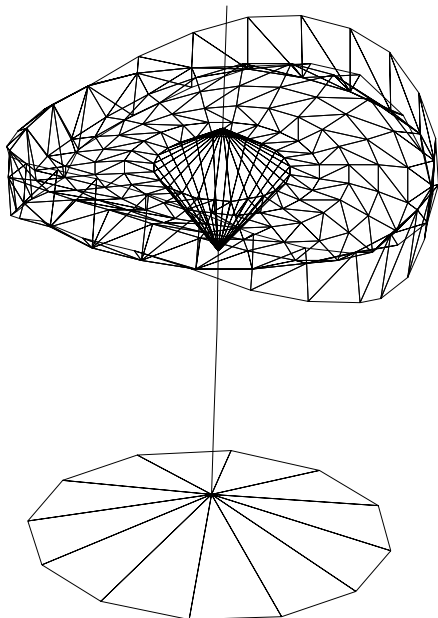
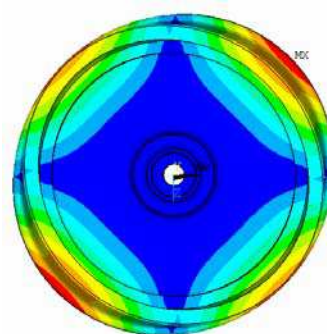
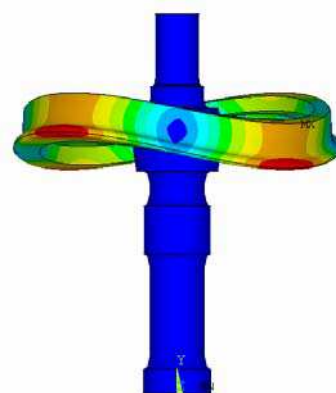
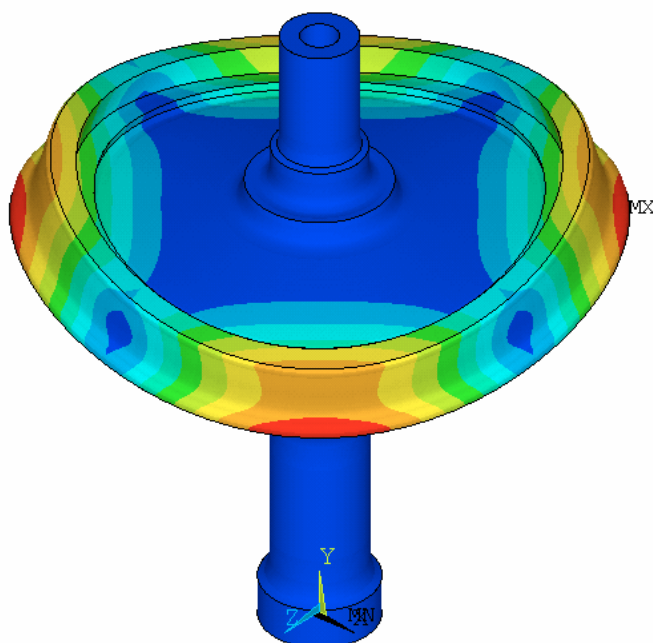
Č.vl.Tv.

Frekvence vlastního tvaru kmitání zjištěná numerickým výpočtem:

315,0 Hz

Relativní chyba vztážená k naměřené hodnotě:

0,5 %

**4****ANSYS**Tab.4: Ukázka karty pro vlastní tvar kmitání č.4, grafické výstupy z programu *STAR* a *Ansys*

## 8 Harmonická analýza železničního kola

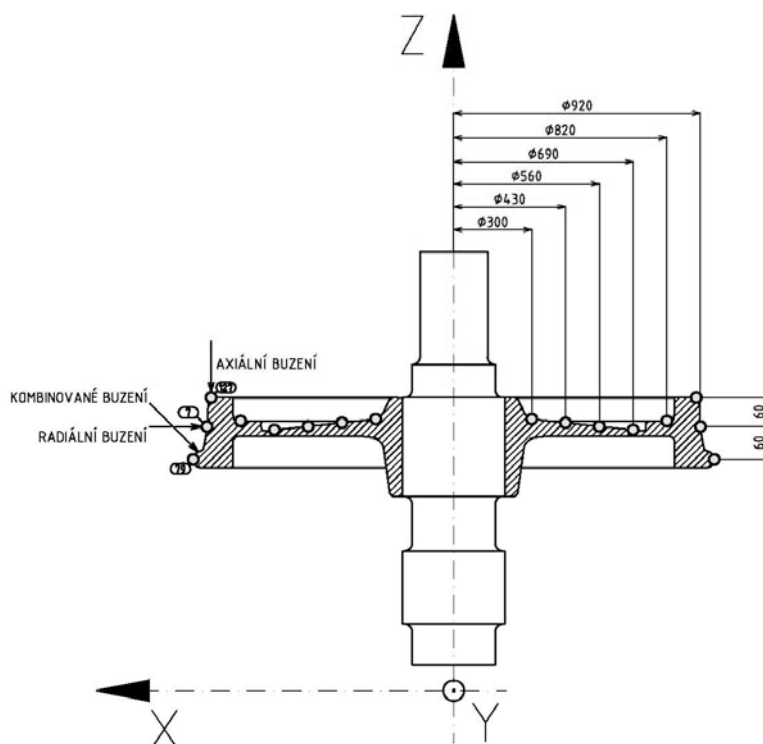
V předchozím textu byl proveden stručný popis experimentální modální analýzy a modální analýzy matematického modelu zkoumaného železničního kola. Dalším navrženým postupem, který byl následně na železniční kolo použit, byla harmonická analýza. Cílem harmonické analýzy bylo posoudit “vybuditelnost” železničního kola na vlastních frekvencích zjištěných při experimentální modální analýze a popřípadě provést jejich zpřesnění. Dále posoudit citlivost měřeného železničního kola na harmonické buzení pro různé směry působení harmonické budicí síly a v neposlední řadě vybrat „akusticky významné“ vlastní tvary kmitání, které by bylo vhodné použít pro poslední fázi akustických měření na železničním kole.

### 8.1 Navržený postup - všeobecné podmínky

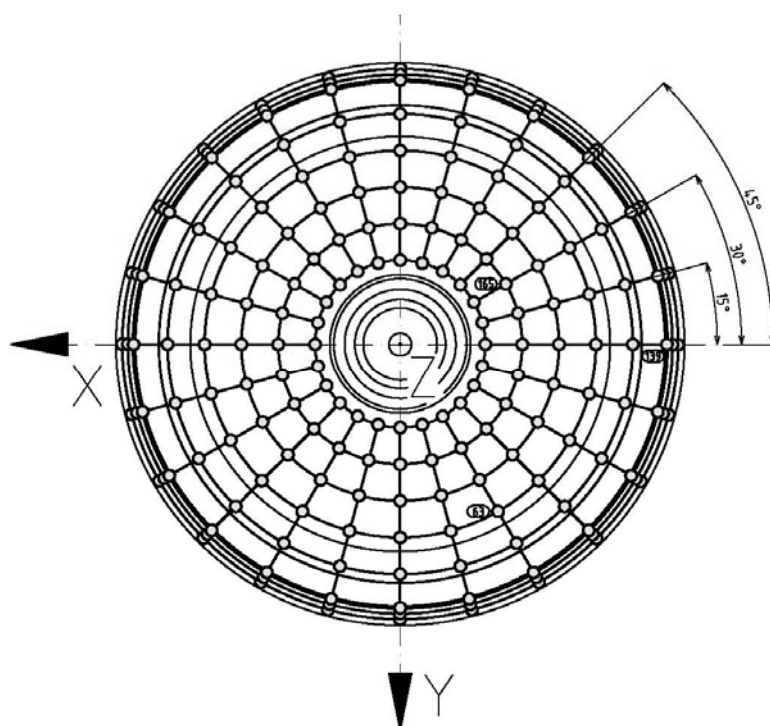
Popis základních vztahů pro řešení úlohy harmonické analýzy již byl proveden v kapitole 5.1, zejména rovnicemi (4), (5),..., (12). Základním předpokladem bylo získání frekvenčních přenosových funkcí, popř. efektivních hodnot zrychlení povrchu železničního kola v několika vybraných bodech při ustáleném harmonickém buzení. Konečná podoba realizované úlohy harmonické analýzy železničního kola byla z velké části určena technickými možnostmi pracoviště, na kterém byla provedena. Všeobecné podmínky, na jejichž základě byl experiment proveden jsou tyto:

- Měřené železniční kolo bylo postupně vystaveno harmonickým budicím silám s frekvencemi, jež byly při modální analýze označeny za vlastní frekvence (buzení v rezonanční oblasti).
- Frekvence harmonických budicích sil byly v průběhu dolad'ovány do rezonančních špiček.
- Měření bylo navíc pro každý kmitočet provedeno ve třech směrech buzení, a sice pro axiální směr buzení, pro radiální směr buzení a pro kombinované buzení (viz obr.30).
- Velikost budicí síly byla vždy maximální s ohledem na mechanické možnosti použitého dynamického budiče.
- Pro všechny zatěžovací stavy byly použité stejné body pro měření odezvy.
- Poloha měřicích bodů byla zvolena s ohledem na tvar deformací pro jednotlivé vlastní tvary kmitání.

Pro navrženou síť měřicích bodů, byla místa pro aplikaci harmonického buzení a snímání odezvy zvolena dle následujících obrázků.

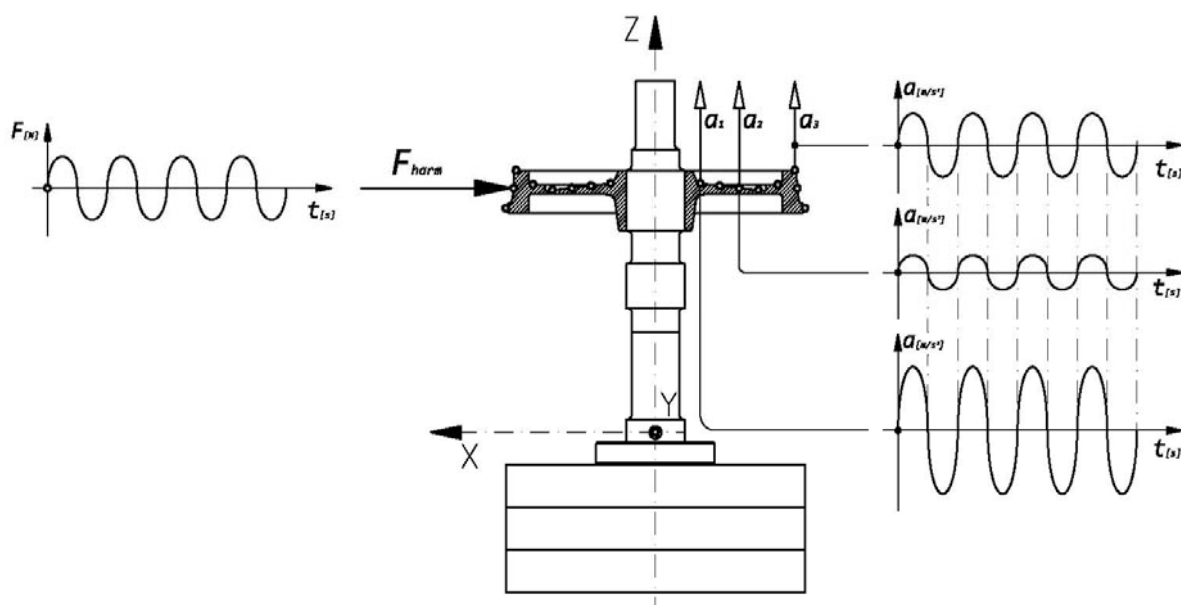


Obr.30: Schématické znázornění působišť a směrů budících sil pro použitá buzení



Obr.31: Rozmístění bodů pro měření odezvy na diskové části kola (body č.63, č.139 a č.165)

Prakticky byla harmonická analýza koncipována tak, aby bylo možno měřit a vyhodnocovat časové průběhy budících silových účinků a zrychlení na povrchu měřeného železničního kola. Z obr.32 mimo jiné vyplývá, že při měření bylo využito všech čtyř dostupných měřicích vstupů frekvenčního analyzátoru.



Obr.32: Schématické znázornění harmonické analýzy železničního kola

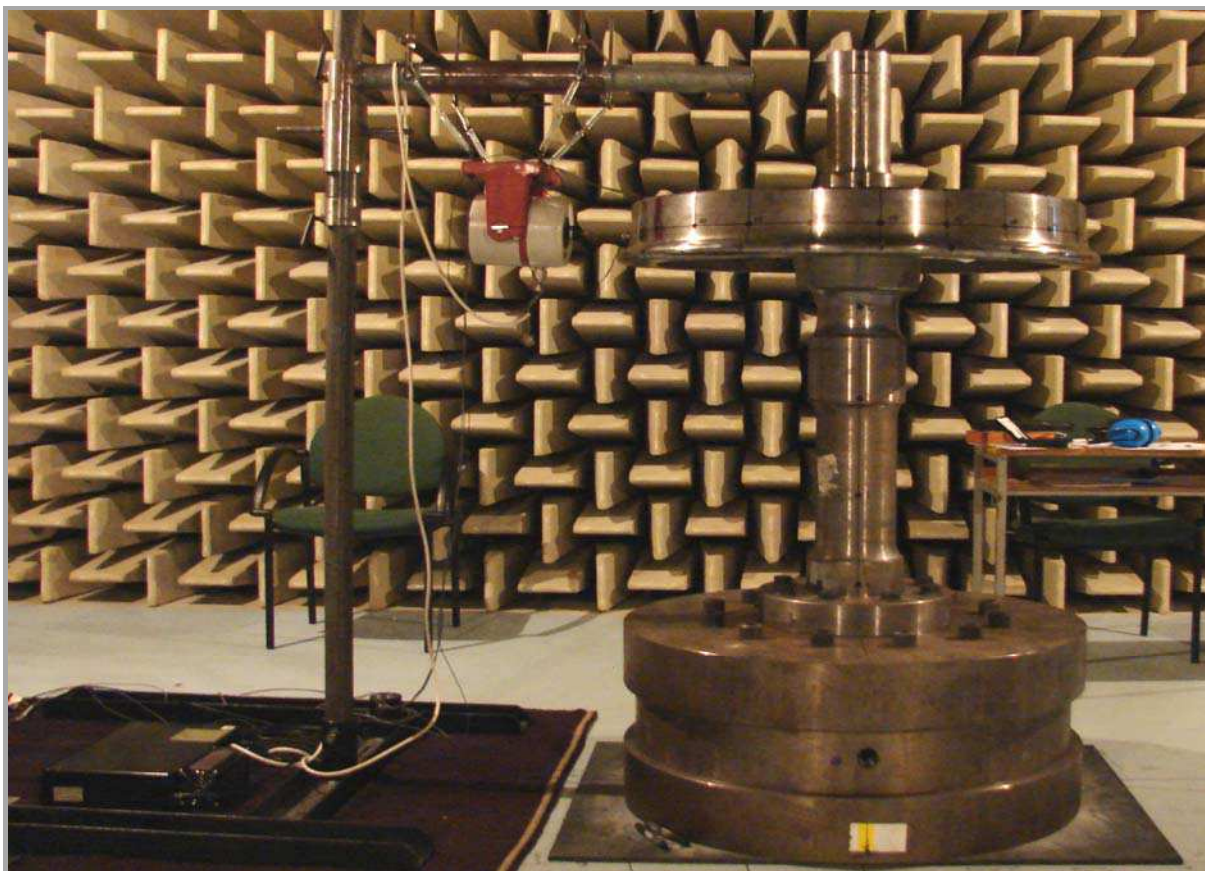
## 8.2 Použité měřicí přístroje

K vlastnímu měření bylo opět využito čtyřkanalového analyzátoru Bruel & Kjaer. Tři měřicí vstupy byly použity pro snímání časových signálů zrychlení z povrchu železničního kola. Čtvrtý vstup byl použit k měření časového průběhu budícího signálu. Snímače zrychlení byly k povrchu měřeného železničního kola připevněny pomocí technického vosku. Budicí síla byla měřena pomocí snímače síly připojeného k měřenému kolu prostřednictvím ocelového kroužku s vnitřním závitem. Ocelový kroužek byl k povrchu měřeného kola přilepen dvousložkovým metalickým lepidlem. Stejně jako v případě prováděné experimentální modální analýzy, i zde příprava každého měření pro konkrétní směr buzení vyžadovala značný čas. Kupříkladu pouhé nalepení závitového ocelového kroužku a následné vytvrzení použitého metalického lepidla pro dosažení jmenovité pevnosti trvalo 24 hodin.

Zdrojem budicí síly byl dynamický budič napájený vhodným nízkofrekvenčním zesilovačem. Budič byl pružně zavěšen na pomocném ustalovacím rámu, který umožnil volit různé směry použitého buzení.



Měřené železniční kolo připravené k harmonické analýze s radiálním buzením je na následujících obrázcích 33 až 35.

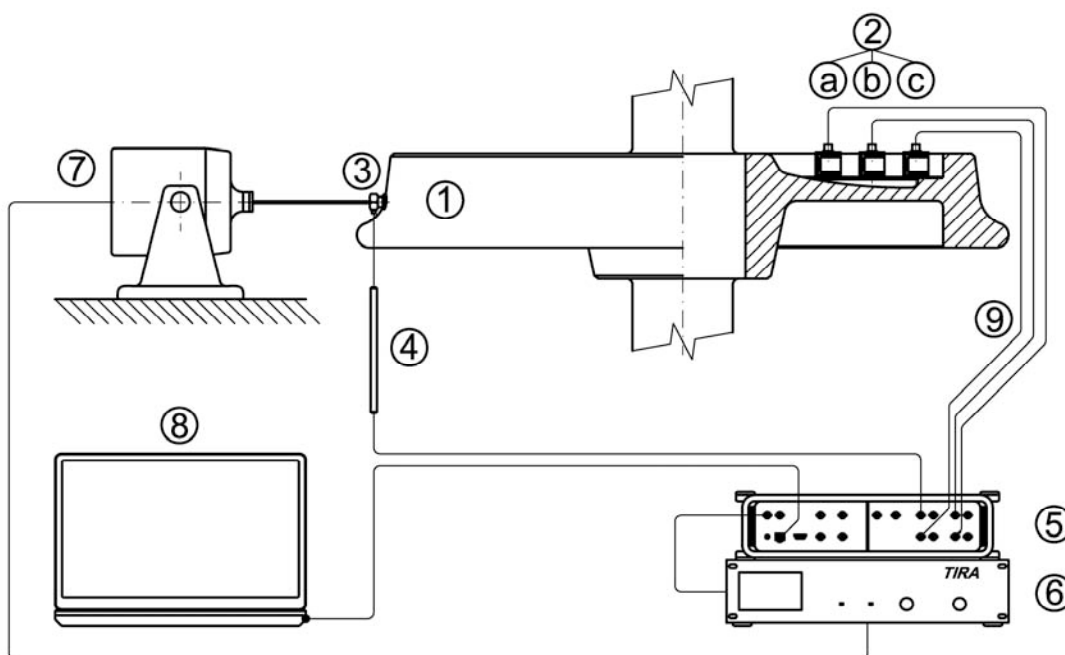


Obr.33: Celkový pohled na měřenou sestavu



Obr.34, obr.35: Detailní zobrazení připojeného dynamického budiče a osazených snímačů zrychlení

Pro snazší představu celé situace bylo zpracováno i blokové schéma celé sestavy, viz obr.36. Signálový výstup frekvenčního analyzátoru (5) byl připojen na vstup nízkofrekvenčního zesilovače (6). Přiváděný harmonický signál se zvoleným kmitočtem byl výkonově posílen a přiveden na svorky dynamického budiče (8). Tento prostřednictvím budicí tyče, přes snímač síly (3), vybudil měřené kolo (1). Odezva pak byla snímána akcelerometry (2,a), (2,b) a (2,c) a zpracována na signálových vstupech frekvenčního analyzátoru (5). Na vstup frekvenčního analyzátoru byl přes nábojový předzesilovač (4) přiveden i budicí signál ze snímače síly (3). Celá úloha byla řízena z měřicího počítače (8).



Obr.36: Blokové schéma uspořádání měřicího řetězce

Pro úplnost následuje výpis použitých měřicích přístrojů doplněný o základní technické parametry.

1. Měřená soustava železničního kola s osou a základem
2. Snímače zrychlení
  - a, B&K - Type 4507 B 001, DeltatTron Akcelerometr, jmenovitá citlivost 1,010 mV/ms<sup>-2</sup>, S/N 10171
  - b, B&K - Type 4507 B 001, DeltatTron Akcelerometr, jmenovitá citlivost 1,010 mV/ms<sup>-2</sup>, S/N 10175
  - c, B&K - Type 4507 B 005, DeltatTron Akcelerometr, jmenovitá citlivost 107,7 mV/ms<sup>-2</sup>, S/N 30067



3. Snímač síly
  - B&K - Type 8200, jmenovitá citlivost 4,07pC/N, SN 1551936
4. Nábojový zesilovač
  - B&K - Type 2647 A, Nábojový předzesilovač, S/N 2347603
5. Frekvenční analyzátor
  - B&K - Type 3560C, univerzální vysokorychlostní analyzátor, S/N 2348762
  - B&K - Type 3109, 4/2 kanálový modul
  - B&K - Type 7533, modul síťového rozhraní
6. Výkonový zesilovač
  - LDS - Type PA100 - E, S/N 880560-374
7. Dynamický budič
  - LDS - Type V406, S/N 30251-4
8. Notebook pro zpracování dat
  - B&K - PULSE v.12.0.0, *Lab Shop Modul*
  - Microsoft Excel 2007
9. Signálové a výkonové kabely
10. Ostatní pomůcky a příslušenství
  - Stojan k zavěšení dynamického budiče
  - Budicí tyč
  - Závitové kroužky pro přenos síly
  - Dvousložkové metalické akryluretanové lepidlo
  - Technický vosk k upevnění snímače zrychlení
  - Odmašťovací prostředky
  - Svinovací metr
  - Fotoaparát

### 8.3 Příprava projektu pro měření

Na rozdíl od předchozí úlohy experimentální modální analýzy, při níž bylo s výhodou využito připraveného funkčního projektu v aplikaci *Modal Test Consultant*, musel být projekt pro realizaci harmonické analýzy od základu sestaven dle požadavků na výstupy. Měřicí projekt byl sestaven ve dvou variantách:

1. Širokopásmové buzení měřené sestavy náhodným signálem (bílý šum) s cílem ověřit existenci a polohu rezonančních špiček ve frekvenčním spektru měřené odezvy.
2. Ustálené harmonické buzení na vlastních frekvencích s cílem jejich zpřesnění a posouzení jejich „akustické významnosti“.

U obou variant však bylo zachováno nastavení FFT analýzy měřených signálů. Ve vazbě na parametry použitého zařízení a dle doporučení nalezených v [5] byla FFT analýza nastavena takto:

–	frekvenční rozsah analýzy	6400 Hz
–	počet frekvenčních čar	6400
–	frekvenční rozlišení	1 Hz
–	typ průměrování	lineární
–	počet průměrů	100
–	překrytí časových oken	66,67%

Nastavení signálového generátoru bylo, jak vyplývá ze zadání, dvojí. Buďto byl generátor nastaven jako generátor náhodného signálu, nebo jako generátor harmonického signálu.

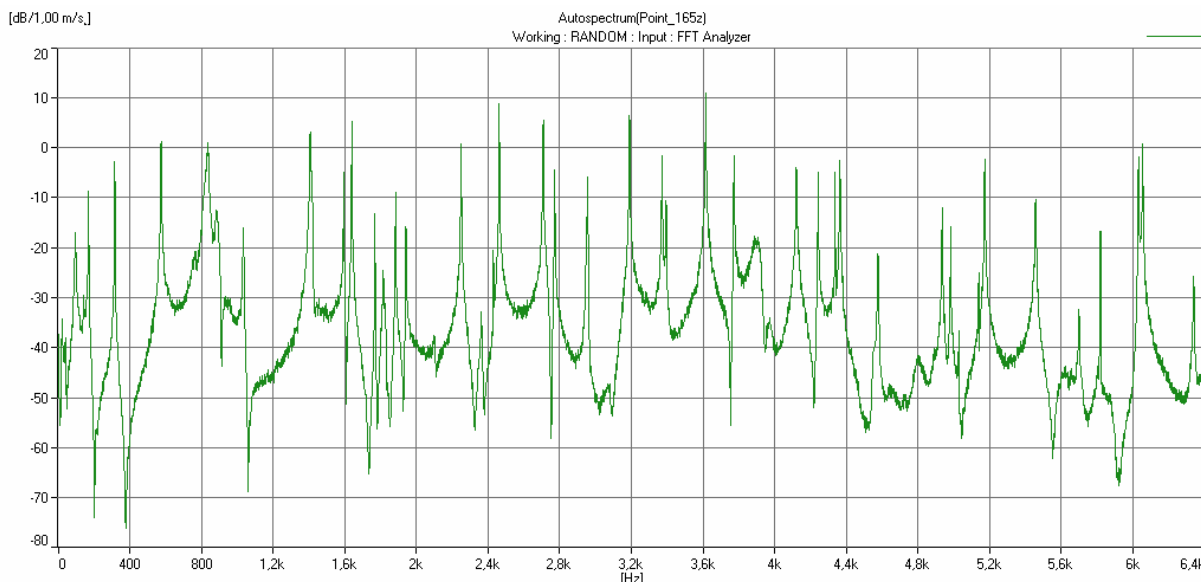
*Generátor náhodného signálu:*

–	frekvenční rozsah	6400 Hz
–	typ použitého filtru	DP
–	ef. hodnota výstupního napětíového signálu	1 V

*Generátor harmonického signálu:*

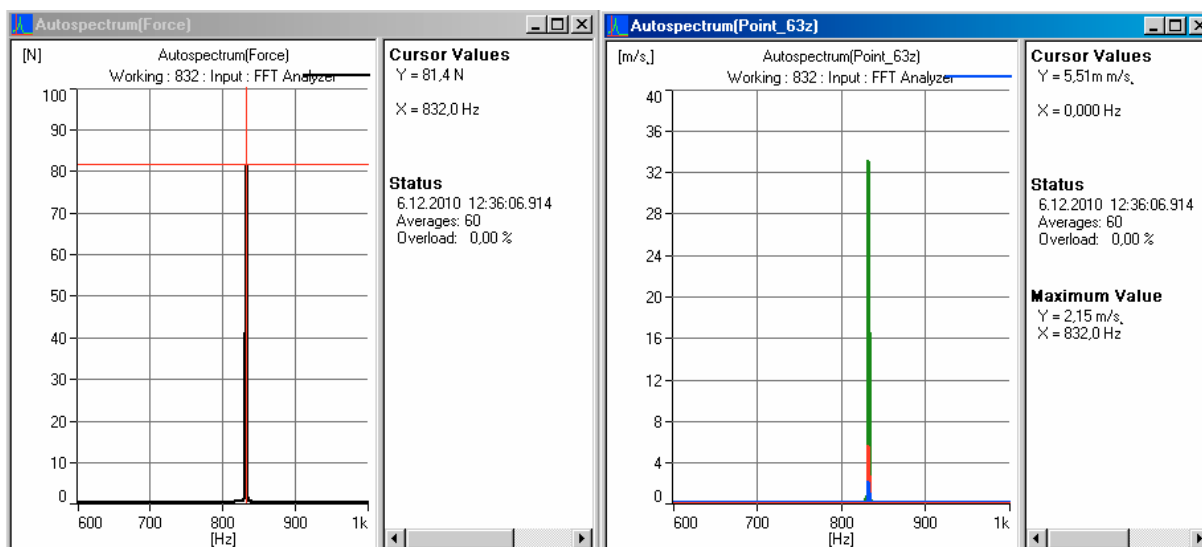
–	Diskrétní kmitočty dle výsledků modální analýzy z intervalu	0 - 5000 Hz
–	ef. hodnota výstupního napětíového signálu	1 V

Ukázka frekvenčního spektra signálu zrychlení pro jeden ze tří měřených bodů je na následujícím obrázku. Z frekvenčního spektra je na první pohled dobře patrná pozice většiny zjištěných rezonančních špiček. Frekvenčních spekter získaných z buzení náhodným signálem bylo s výhodou využito při předběžném posuzování významnosti jednotlivých vlastních tvarů kmitání.



Obr.37: Frekvenční spektrum zrychlení na povrchu kola v bodě 165 při širokopásmovém buzení

Následně byl signálový generátor nastaven do režimu generátoru harmonického signálu a bylo provedeno postupné měření přes všechny zjištěné vlastní frekvence, které byly v některých případech, jak bude popsáno dále, do jisté míry zpřesněny. Na následujícím obrázku je ukázka grafického výstupu připravené harmonické analýzy pro buzení kola kmitočtem 832 Hz.

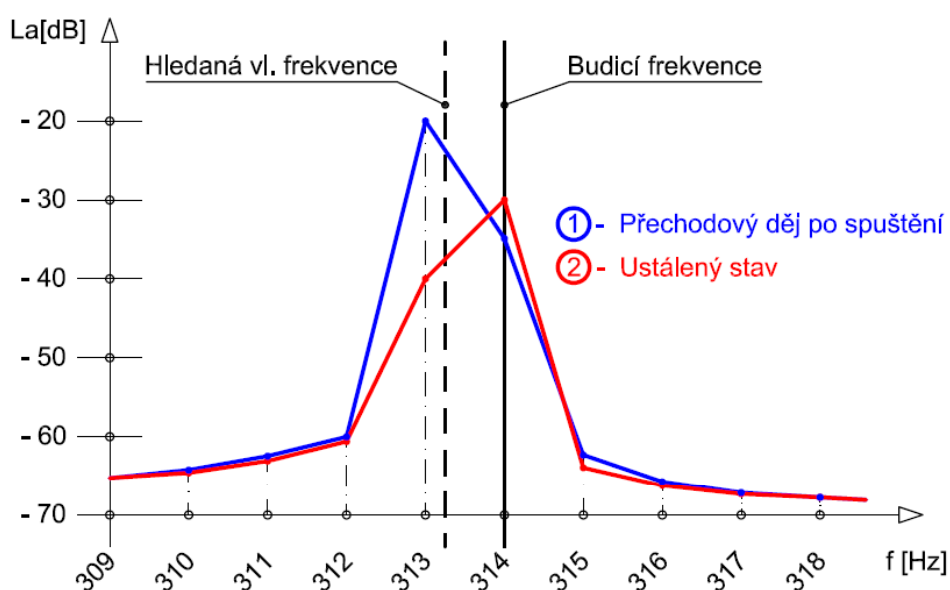


Obr.38: Ukázka grafických výstupů harmonické analýzy pro buzení na kmitočtu 832 Hz

## 8.4 Výsledky získané harmonickou analýzou

Na Obr.38 je rovněž zachyceno základní pracovní prostředí úlohy harmonické analýzy. Ze zobrazených grafů byly pomocí kurzoru přímo odečítány efektivní hodnoty budících sil a efektivní hodnoty zrychlení ve třech bodech na povrchu železničního kola. Pro jednotlivé kmitočty byly hodnoty postupně zaváděny do tabulek, které jsou uvedeny v závěru této kapitoly.

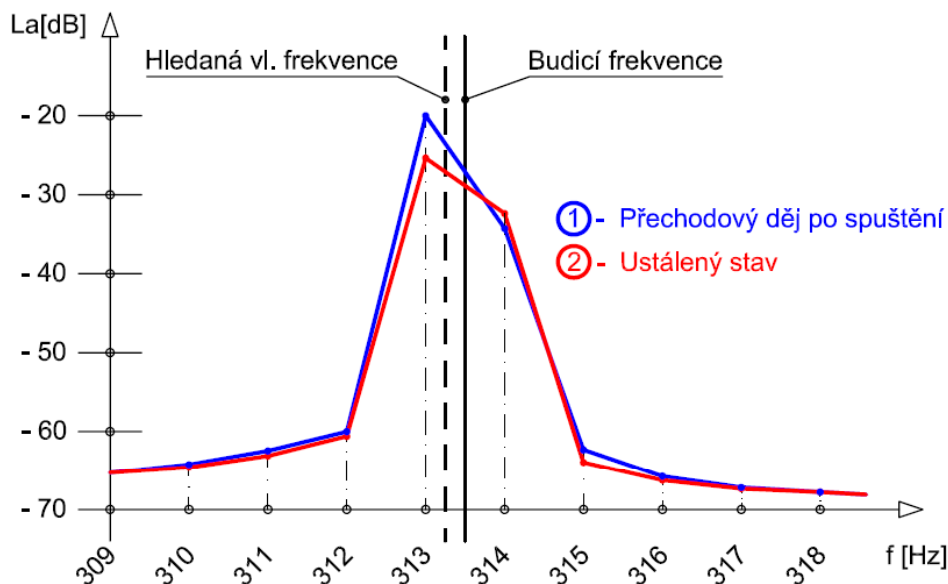
Cílem prováděné harmonické analýzy bylo také zpřesnit vlastní frekvence kmitání železničního kola (rozlišovací schopnost experimentální modální analýzy na vyšších kmitočtech nebyla příliš vysoká). Pro tyto účely byla při harmonické analýze odvozena poměrně jednoduchá, ale velmi účinná technika, která byla pracovně nazvána „záznějová metoda“ a vychází z chování struktury při buzení v blízkosti rezonanční oblasti. Základní myšlenka a postup při této technice je prezentován v následujících obrázcích.



Obr.39: Detailní zobrazení části frekvenčního spektra při výchozím měření

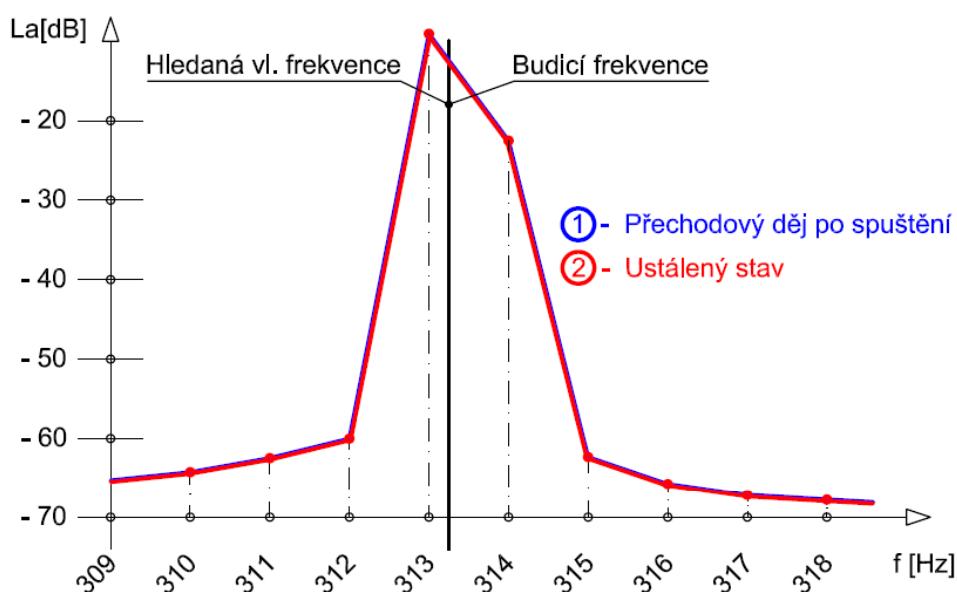
Při výchozím měření byla vždy budící frekvence zvolena jako celé číslo, které je nejbližší příslušné vlastní frekvenci kmitání železničního kola. Jestliže se vlastní frekvence se zvolenou budící frekvencí úplně neshodovaly, nastal po spuštění buzení krátký přechodový děj, jehož bylo s výhodou využito. Na obr.39, byla budící frekvence nastavena na 314 Hz. Z obrázku je rovněž zřejmé, kde se hledaná vlastní frekvence skutečně nacházela. Ihned po spuštění generátoru se poměrně výrazně projevil přechodový jev a měřené kolo ze zavlnilo na příslušné vlastní frekvenci, přičemž frekvenční spektrum odpovídalo modrému průběhu.

Velmi krátce na to (řádově 10 průměrů) se situace uklidnila a systém přešel do červeně vyznačeného stavu (ustálený stav). U akusticky významných vlastních tvarů kmitání byl přechodový jev doprovázen dobře slyšitelnými zánějovými složkami, odkud pramení název postupu. Další budicí frekvence byla zvolena metodou půlení, přičemž směr frekvenčního posuvu je naprosto zřejmý.



Obr.40: Detailní zobrazení části frekvenčního spektra při druhém kroku zpřesňování

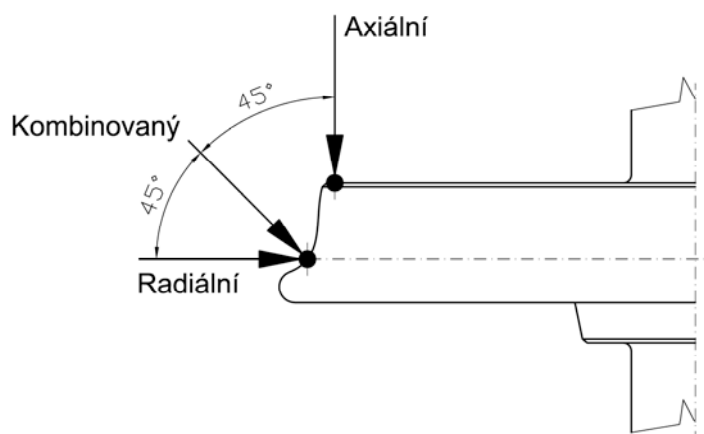
Ve druhém kroku dle obr.40 byla budicí frekvence v souladu s předchozím výkladem snížena na hodnotu 313,5 Hz. Z obrázku je zřejmé, že při postupném přibližování vlastní a budicí frekvence zaniká rozdíl mezi přechodovým jevem a ustáleným stavem.



Obr.41: Detailní zobrazení části frekvenčního spektra při posledním kroku zpřesňování

V ideálním případě, kdy v posledním kroku došlo ke ztotožnění budící a vlastní frekvence, přešel systém do stavu dle obr.41. Základním znakem buzení v rezonanci byla skutečnost, že se sledované frekvenční spektrum blížilo do ustáleného stavu zespoda a nedocházelo k tomu, že by přechodový děj amplitudově převyšoval spektrum ustáleného stavu. Touto metodou byla zpřesněna experimentálním způsobem řada vlastních frekvencí kmitání zkoumaného železničního kola.

Na tomto místě je ale rovněž nutno dodat, že přílišná snaha o přesné hodnoty není zcela namístě. Jak bylo zjištěno v průběhu prováděných měření, pouhá demontáž a zpětná montáž dynamického budiče dokázala ovlivnit polohu vlastních tvarů kmitání měřeného železničního kola o desetiny a v některých případech dokonce o jednotky Hz.



Obr.42: Přehledový náčrtek zvolených směrů buzení železničního kola.

Na dalších stranách jsou v tabulkách postupně uvedeny efektivní hodnoty harmonických budících sil a zrychlení, které budící účinky na jednotlivých frekvencích vyvolaly. Tabulky jsou v souladu s obr.42 celem tří a respektují rozdělení naměřených dat dle směru použitého buzení. V tabulkách jsou navíc uvedeny v každém kroku dva kmitočty. První kmitočet vyjadřuje přesnou hodnotu, která byla v posledním kroku (po naladění do rezonance) nastavena jako parametr generátoru signálu pro buzení struktury. Druhý kmitočet odpovídá střední frekvenci frekvenční čáry (použité frekvenční rozlišení umožnilo odečítat s přesností na 1 Hz), na které byly odečítány efektivní hodnoty měřených zrychlení.

Takto získané výsledky byly jako podklady pro harmonickou analýzu na matematickém modelu předány pracovníkům technického vývoje společnosti Bonatrans Group a.s.. Kompletní grafické výstupy harmonické analýzy byly s ohledem na rozsah práce umístěny do digitálních příloh.

## 8.4.1 Radiální buzení

Měřená veličina	Síla		Zrychlení	Zrychlení	Zrychlení
Jednotka	[N]		[m/s <sup>2</sup> ]	[m/s <sup>2</sup> ]	[m/s <sup>2</sup> ]
Bod působení / měření	7		165	63	139
Směr působení / měření	-X		-Z	-Z	-Z
Fr. Buzení	Fr. Snímání				
[Hz]	[Hz]				
90,14	90	40,6	0,33	0,08	0,22
139,22	139	36,5	0,34	0,76	1,39
166,5	166	31,4	2,41	1,92	2,34
313,13	313	37,7	65,3	49,6	300
571,4	571	20,4	13,8	0,16	0,28
832	832	71,6	8,98	0,32	0,75
889,8	890	78,2	17,7	55,6	155
1400	1400	6,52	2,78	0,32	0,09
1410	1410	6,34	1,48	0,23	0,03
1590	1590	4,35	28,6	4,14	0,77
1640	1640	4,27	0,62	0,62	1,28
1760	1760	3,29	9,17	1,11	0,16
1810	1810	3,26	2,46	0,14	0,02
1880	1880	2,82	23,6	9,23	0,43
1940	1940	2,72	7,23	0,56	0,01
2100	2100	4,54	8,07	0,26	0,02
2250	2250	4,21	38,3	8,35	1,53
2430	2430	3,13	5,14	0,28	0,41
2460	2460	3,13	14,1	0,66	5,54
2700	2700	2,45	5,73	0,08	0,03
2770	2770	2,78	80,5	5,44	5,67
2950	2950	2,24	1,48	0,54	0,05
3190	3190	1,84	13,3	3,46	0,49
3370	3370	1,56	5,64	0,13	0,23
3390	3390	1,58	27,1	0,38	4,03
3610	3610	1,47	11,4	1,52	0,08
3770	3770	1,32	13,5	7,29	0,26
4110	4110	1,15	12,3	0,11	2,44
4240	4240	1,11	0,78	0,61	1,86
4330	4330	1,06	25,4	2,48	0,08
4360	4360	1,12	70,1	2,14	0,89
4380	4380	1,12	12,2	3,17	0,23

Tab.5: Výpis efektivních hodnot sil a zrychlení pro radiální směr buzení

## 8.4.2 Axiální buzení

Měřená veličina	Síla		Zrychlení	Zrychlení	Zrychlení
Jednotka	[N]		[m/s <sup>2</sup> ]	[m/s <sup>2</sup> ]	[m/s <sup>2</sup> ]
Bod působení / měření	127		165	63	139
Směr působení / měření	-X		-Z	-Z	-Z
Fr. Buzení	Fr. Snímání				
[Hz]	[Hz]				
90,14	90	25,3	4,32	0,75	2,03
139,22	139	22,2	1,11	1,21	2,17
166,5	166	16,7	14,7	11,7	14,2
313,13	313	3,99	13,7	10,3	60,4
571,4	571	26,2	41,2	0,53	0,92
832	832	81,4	33,1	2,15	5,52
889,8	890	1,05	5,92	20,1	56,3
1400	1400	13,6	41,4	3,48	0,45
1410	1410	13,3	33,6	6,25	1,51
1590	1590	9,62	17,4	1,98	1,91
1640	1640	3,47	40,2	17,8	66,1
1760	1760	7,37	0,87	0,18	0,43
1810	1810	6,79	2,88	0,25	0,32
1880	1880	6,07	12,2	4,69	0,43
1940	1940	5,63	5,65	0,23	0,16
2100	2100	4,55	0,64	0,07	0,14
2250	2250	3,81	10,5	1,58	0,08
2430	2430	3,14	1,64	0,12	0,88
2460	2460	3,55	89,1	3,46	33,1
2700	2700	2,43	17,9	0,38	0,96
2770	2770	2,33	17,3	1,13	0,61
2950	2950	2,23	8,45	2,31	0,14
3190	3190	2,06	27,3	6,33	0,81
3370	3370	1,64	23,7	3,65	5,06
3390	3390	1,63	10,7	0,66	0,62
3610	3610	1,34	69,6	9,12	1,24
3770	3770	1,29	55,6	13,7	0,79
4110	4110	1,27	8,58	0,14	1,57
4240	4240	0,91	29,2	2,87	16,4
4330	4330	1,12	3,41	0,19	0,28
4360	4360	1,08	35,2	0,45	0,55
4380	4380	1,09	2,58	0,54	0,02

Tab.6: Výpis efektivních hodnot sil a zrychlení pro axiální směr buzení



## 8.4.3 Kombinované buzení

Měřená veličina	Síla		Zrychlení	Zrychlení	Zrychlení
Jednotka	[N]		[m/s <sup>2</sup> ]	[m/s <sup>2</sup> ]	[m/s <sup>2</sup> ]
Bod působení / měření	7		165	63	139
Směr působení / měření	-X		-Z	-Z	-Z
Fr. Buzení	Fr. Snímání				
[Hz]	[Hz]				
90,12	90	33,7	4,83	0,93	2,34
139,22	139	29,5	1,38	1,62	3,03
166	166	37,7	22,3	17,6	21,8
312,6	313	79,2	53,1	40,1	244
571,4	571	37,1	47,6	0,62	1,06
832	832	87,3	52,4	3,12	7,06
889,8	890	5,01	7,86	23,5	65,4
1404	1404	6,74	172	10,6	3,39
1410	1410	9,66	74,5	14,6	2,85
1591,5	1592	3,85	15,6	2,32	1,16
1636	1636	28,7	132	60,5	187
1765	1765	4,93	167	18,4	2,32
1810	1810	5,03	14,4	1,22	0,38
1880	1880	4,5	17,4	4,85	0,42
1939	1939	2,95	74,1	2,17	0,19
2100	2100	3,33	30,4	0,07	0,13
2246	2246	1,53	11,3	3,66	1,24
2428	2428	1,63	36,5	2,48	0,62
2458,5	2459	3,11	282	19,2	110
2705	2705	1,03	91,9	2,65	1,46
2768,5	2769	1,23	115	7,53	7,36
2953	2953	1,12	329	7,31	0,54
3186	3186	1,01	97,3	22,9	3,44
3364,3	3364	1,35	181	27,1	34,8
3387	3387	1,94	108	2,27	14,1
3610,5	3610	1,12	145	18,5	2,91
3770	3770	1,06	24,3	2,54	0,27
4111	4111	1,35	27,2	0,39	5,28
4236	4236	1,83	52,5	11,9	50,5
4333	4333	1,16	30,2	2,75	1,18
4359	4359	1,19	138	10,5	1,93
4380	4380	1,18	2,92	0,17	0,26

Tab.7: Výpis efektivních hodnot sil a zrychlení pro kombinovaný směr buzení

#### 8.4.4 Budicí kmitočty pro akustická měření

Informace získané při harmonické analýze byly s výhodou využity i při volbě kmitočtů, jež byly aplikovány na měřené železniční kolo při prováděných akustických měřeních. Budicí kmitočty pro akustická měření byly, z tabulek uvedených na předchozích stranách, vybírány na základě dvou kritérií:

- Měřené železniční kolo se na příslušném vlastním tvaru kmitání podařilo vybudit do stavu , při kterém alespoň jedno ze sledovaných zrychlení přesáhlo hodnotu  $10 \text{ m/s}^2$ .
- Kromě podmínky na dostatečně „aktivní“ odezvu bylo druhým požadavkem, aby byl vybuděný vlastní tvar i dobře slyšitelný, resp. akusticky významný. Tato klasifikace byla provedena subjektivním hodnocením v polobezodrazové místnosti.

Protože bylo při akustických měřeních předpokládáno jak radiální, tak axiální buzení, byly vybírány budicí kmitočty na základě tab.42, která představuje kombinaci obou stavů.

Č.	Číslo vl. tvaru kmitání dle EMA	Frekvence buzení [Hz]	Zrychlení	Zrychlení	Zrychlení
			[m/s <sup>2</sup> ]	[m/s <sup>2</sup> ]	[m/s <sup>2</sup> ]
			Bod - 165	Bod - 63	Bod - 139
1.	4	313	53,1	40,1	244
2.	7	890	7,86	23,5	65,4
3.	11	1636	132	60,5	187
4.	15	1939	74,1	2,17	0,19
5.	18	2428	36,5	2,48	0,62
6.	19	2459	282	19,2	110
7.	20	2705	91,9	2,65	1,46
8.	21	2769	115	7,53	7,36
9.	22	2953	329	7,31	0,54
10.	24	3364	181	27,1	34,8
11.	26	3610	145	18,5	2,91
12.	33	4359	138	10,5	1,93
13.	35	4980	-	-	-

**Pozn.:** Budicí kmitočty č.13, který odpovídá buzení na vlastním tvaru kmitání č.35, byl do akustických měření zahrnut na přání zadavatele, a to navzdory skutečnosti, že nesplnil výběrová kritéria.

Tab.8: Výpis budících frekvencí vybraných pro akustická měření železničního kola

## 8.5 Alternativní stanovení tlumení železničního kola

V průběhu dalšího zpracování dat, získaných při provedené experimentální modální analýze a harmonické analýze bylo zjištěno, že se výsledky v některých případech značně liší od výstupů z již „odladěného“ numerického modelu železničního kola. Přestože se podařilo malými úpravami lineárních konstant numerického modelu dosáhnout velmi dobré shody se skutečným kolem na hodnotách vlastních frekvencí, vznikly při harmonickém buzení v některých rezonančních oblastech matematického modelu a měřeného vzorku značné rozdíly.

V dalším postupu byl proveden podrobný rozbor situace. Byla provedena citlivostní analýza matematického modelu na variaci materiálových konstant, a to s naprosto jednoznačným výsledkem. U velmi málo tlumených soustav, mezi které měřené železniční kolo bezesporu patří, je z pohledu odezvy kritickým parametrem zadaná hodnota tlumení. Zejména při harmonickém buzení v rezonanční oblasti může chybně definované tlumení v řádu desítek procent změnit výsledná zrychlení v rozsahu jednoho řádu. V dalším textu jsou stručně popsány dvě základní metody, běžně používané pro stanovení tlumení.

### 8.5.1 Odečet tlumení z třídecibelového poklesu

Tlumení se v současné době nejčastěji určuje na základě změřeného frekvenčního přenosu. Metoda je pro svou jednoduchost využívána v převážné většině nástrojů pro vyhodnocování dat z experimentální modální analýzy. Vyžaduje pouze výpočet rozdílů kruhových frekvencí na kterých poklesla úroveň zjištěné FRF o 3dB od lokálního maxima, které představuje úroveň v rezonanci.

Skutečný význam poklesu o 3dB je odvozen od poklesu hodnoty výkonu, jehož dosáhla FRF v rezonanci na polovinu jeho hodnoty. Základním úkolem je tedy nalezení bodů s polovičním výkonem, tzv. „*half power points*“. Převedením do decibelových stupnic pak lze snadno prokázat, že pokles na polovinu představuje v hladinovém vyjádření snížení hladiny příslušné veličiny o 3dB.

$$\frac{H(\omega)_{RES}}{H(\omega)_{H.P.}} = \sqrt{2} \quad (16)$$

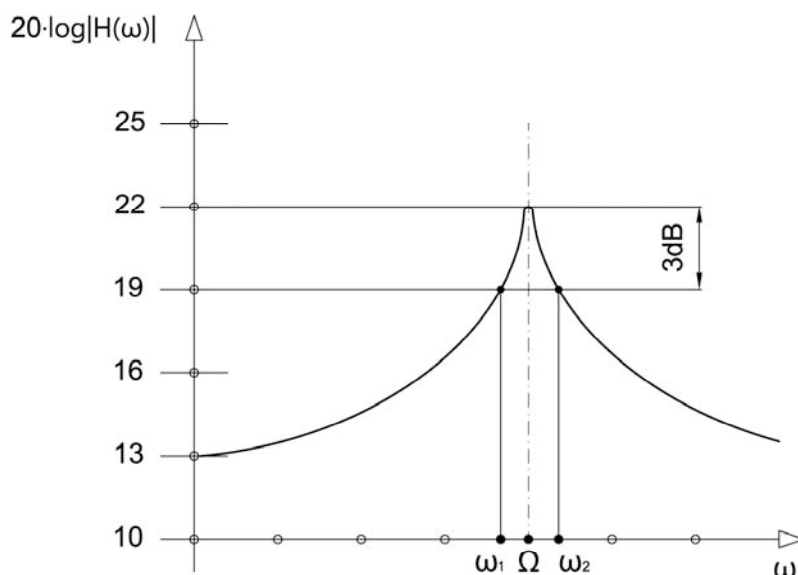
$$20 \cdot \log H(\omega)_{RES} - 20 \cdot \log H(\omega)_{H.P.} = 20 \cdot \log \sqrt{2} = 3\text{dB} \quad (17)$$

Výpočet konstanty dozívání na základě odečtených kruhových frekvencí v místech s polovičním výkonem je pak velmi prostý.

$$\Delta\omega_{3dB} = \omega_2 - \omega_1 = 2 \cdot \delta \quad (18)$$

$$b_r = \frac{\delta}{\Omega} \cdot 100\% = \frac{\delta}{2 \cdot \pi \cdot f_0} \cdot 100\% \quad (19)$$

Poměrně běžný, ve smyslu výstupu z měřicího prostředí, je zápis tlumení pomocí tzv. poměrného útlumu v procentuálním vyjádření, jehož výpočet na základě konstanty dozívání ukazuje rovnice (19).



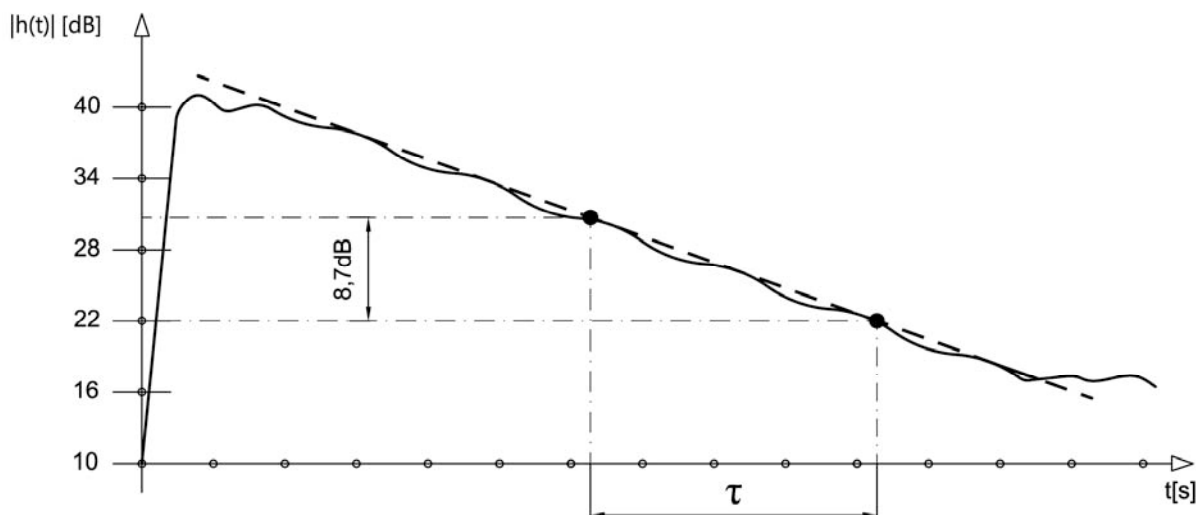
Obr.43: Odečet šířky 3dB pásma pro stanovení konstanty dozívání

Přestože se výše popsaná metoda jeví jako poměrně jednoduchá a spolehlivá, přináší její použití v kombinaci s použitím modálního kladívka pro buzení měřené soustavy řadu nevýhod, které, pokud nejsou zohledněny, mohou vést ke zcela chybně stanovenému poměrnému útlumu. Možné chyby budou podrobně probrány v dalším textu.

### 8.5.2 Odečet tlumení z impulsní odezvy

Druhou alternativou stanovení tlumení systému na konkrétním vlastním tvaru kmitání je přímé odečtení z logaritmovaného průběhu obálky impulsní odezvy. Impulsní odezva může být vypočtena buďto z frekvenčního přenosu, nebo v případě buzení rázovým kladívkem je možné za impulsní odezvu považovat přímo časový průběh měřené odezvy.

Aby bylo možné stanovit strmost poklesu, resp. tlumení na konkrétní frekvenci, je potřeba analyzovaný časový vzorek signálu ošetřit úzkopásmovým frekvenčním filtrem. Podrobný popis metody je možno nalézt např. v [5]. Pro účely této práce postačí konstatování skutečnosti, že tlumení je stanoveno na základě poklesu obálky impulsní odezvy funkce o 8,7dB.



Obr.44: Schématické znázornění odečtu tlumení z impulsní odezvy funkce

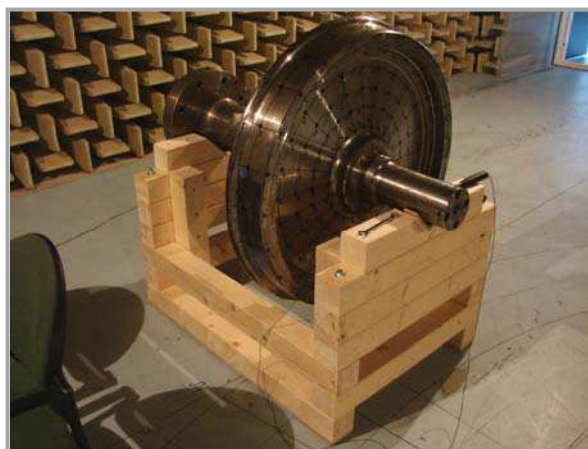
Konstantu dozívání systému na vyšetřovaném frekvenčním rozsahu lze následně vypočítat jako převrácenou hodnotu časové konstanty „ $\tau$ “ odečtené z grafu. Problémy spojené s praktickou aplikací metody na vyšetřovaném železničním kole jsou popsány v dalším textu.

### 8.5.3 Aplikace popsaných metod na železniční kolo

Cílem tohoto měření bylo ověření funkčnosti a následná realizace účinné metody ke zjištění tlumení železničního kola na jednotlivých vlastních tvarech kmitání. Zejména s ohledem na požadavek snadné a rychlé realizace měření byla nejdříve zvolena metoda buzení pomocí rázového kladívka. Pro tyto účely bylo měřené železniční kolo založeno do dřevěného lůžka, jehož výkresová dokumentace je součástí příloh této Disertační práce. Hlavní důvody pro změnu polohy a systému uložení měřené struktury byly následující:

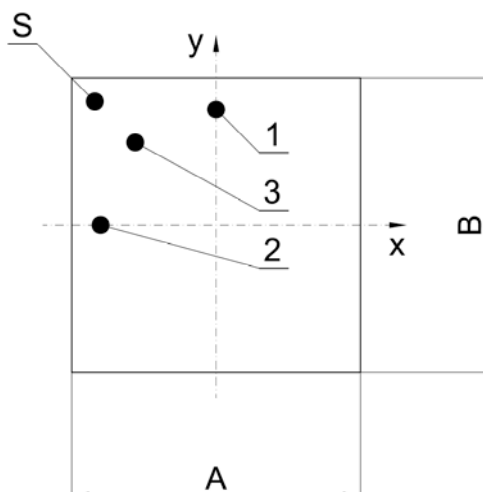
- Uložení měřeného kola či dvojkolí do dřevěného lůžka je v Bonatrans Group, a.s. velmi často používané. Z tohoto pohledu se jevílo odladění metody pro tuto pozici kola jako velmi praktické.
- Bylo odstraněno přídavné tlumení, které do úlohy vnášela pryžová deska mezi základovým blokem a podlahou polobezodrazové místnosti pro uložení dle obr.6 na straně 21.

- Systém se stal jednodušším i z pohledu numerického modelu, což v konečném důsledku vedlo ke zkrácení času potřebného k výpočtu.



Obr.45,a,b: Měřené železniční kolo založené ve svislé poloze v dřevěném lůžku

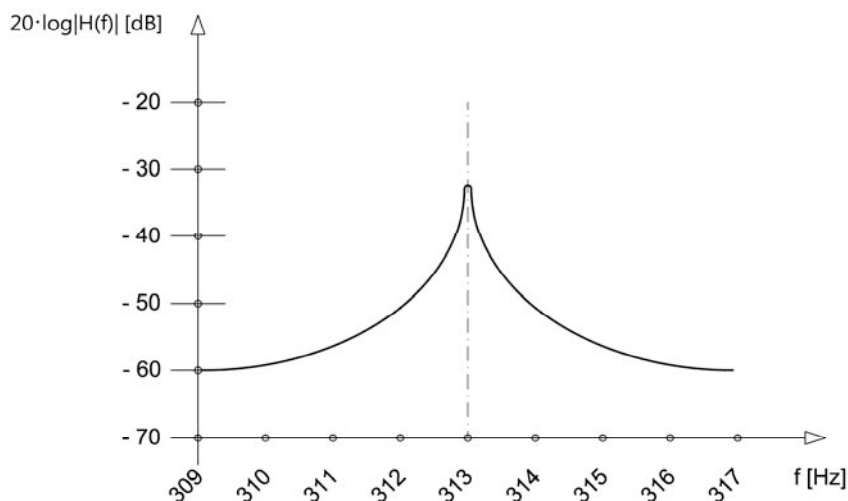
V této fázi měření, kdy byly kladeny velmi vysoké nároky na rozlišovací frekvenci FFT analýzy, se však již silně projevil vlivy, jimž doposud nebyla věnována příliš velká pozornost. Značné problémy přineslo zejména rozštěpení vlastních tvarů v důsledku nevyvážení železničního kola. Celá situace je zjednodušeně popsána na následující modelové úloze.



Obr.46: Tenká obdélníková deska pro demonstraci rozštěpení vlastního tvaru kmitání

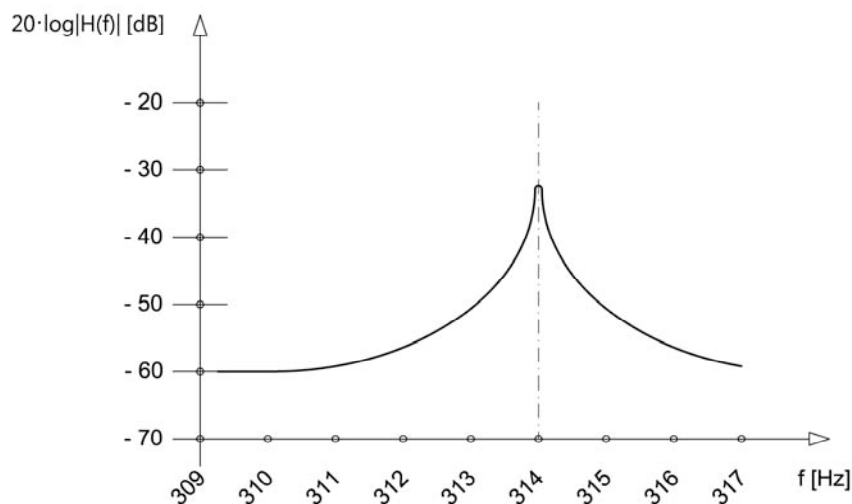
Předpokládejme měření modálních vlastností na tenké, ocelové, obdélníkové desce o délkách stran A a B dle obr.46, kde délky obou stran jsou velmi blízké, ale přesto rozdílné. Na desce byly vyznačeny čtyři body, přičemž tři z nich (body označeny číslicemi 1,2,3) jsou místa, v nichž byla deska postupně buzena rázovým kladívkem a čtvrtý bod s označením „S“ je označení pozice, kde byl permanentně osazen referenční snímač.

Hypotetický frekvenční přenos, stanovený na základě buzení rázovým kladívkem do bodu „1“ by měl v blízkosti první vlastní ohybové frekvence podobu, která je znázorněna na následujícím obrázku.



Obr.47: Předpokládaný průběh frekvenční přenosové funkce v okolí rezonance pro dvojici bodů 1-S

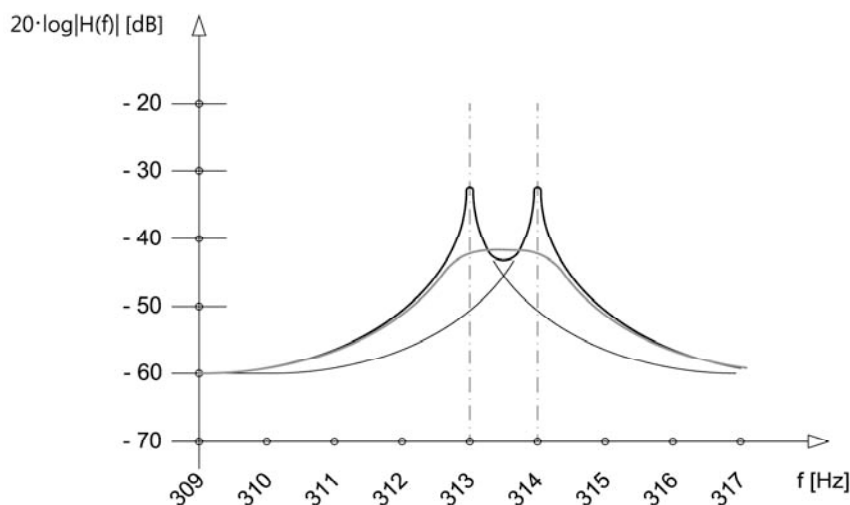
Je zřejmé, že za předpokladu ortogonalit vlastních tvarů se ohybové tvary desky s ohybovými osami rovnoběžnými s osou „y“ nemohou, stejně jako torzní tvary kmitání, při buzení do bodu „1“ vybudit. Obdobná situace nastane při buzení do bodu „2“, který leží na druhé ose symetrie uvažované obdélníkové desky.



Obr.48: Předpokládaný průběh frekvenční přenosové funkce v okolí rezonance pro dvojici bodů 2-S

Jediným rozdílem proti předchozímu případu by bylo drobné frekvenční přeladění příslušné ohybové frekvence, a to s ohledem na rozdíl délek stran A a B uvažované obdélníkové desky.

Konečně předpokládejme buzení, jež bylo provedeno do bodu „3“ dle obr.47, tedy mimo osy symetrie uvažované desky.



Obr.49: Předpokládaný průběh frekvenční přenosové funkce v okolí rezonance pro dvojici bodů 3-S

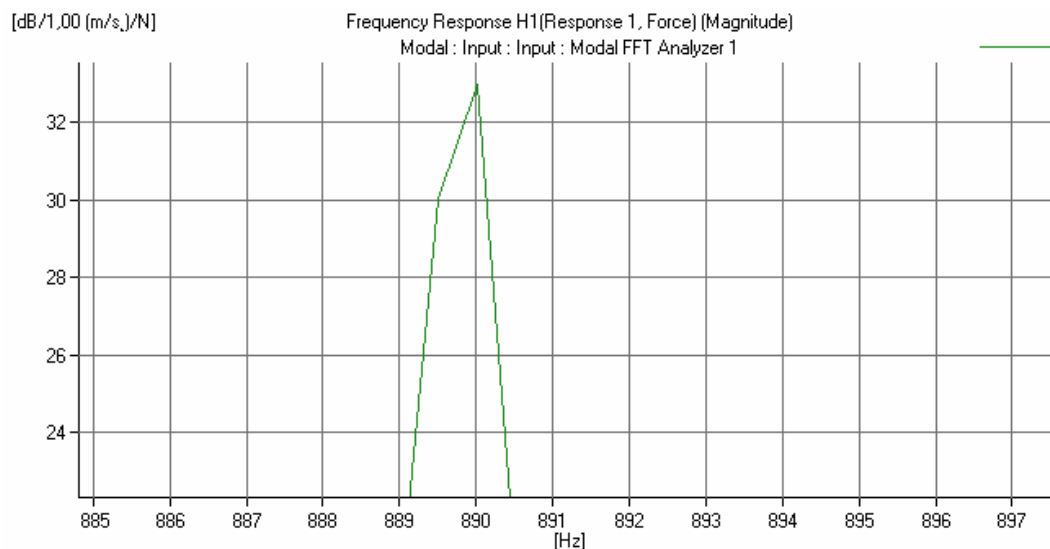
Z obr.49 je zřejmé, že by byly vybudeny oba vlastní tvary kmitání, které by byly pro malé tlumení a dostatečný odstup vlastních frekvencí lokalizovatelné a vyhodnotitelné, zejména z pohledu stanovení tlumení na základě 3dB poklesu frekvenční přenosové funkce. Za předpokladu většího tlumení a malého rozdílu vlastních frekvencí by však průběh frekvenční přenosové funkce mohl přejít do podoby jedné roztažené frekvenční špičky, která je v obr.50 rovněž naznačena. Tlumení stanovené na základě takového průběhu by bylo zcela jistě zkreslené.

Při skutečném měření na železničním kole byla situace ještě komplikovanější. Nesymetrie kola způsobená s největší pravděpodobností nevývahou, nebo materiálovou nehomogenitou, byla poměrně malá, přesto však zapříčinila rozštěpení některých vlastních tvarů kmitání. Drobných nevývah je po obvodu železničního kola pravděpodobně více a proto nebylo možné stanovit osy symetrie. V konečném důsledku se pak pro různá místa měření na železničním kole měnily rezonanční frekvence v řádech setin až desetin Hz. Všechny tyto skutečnosti vedly k závěru, že každý vlastní tvar kmitání bylo při harmonické analýze nutno řešit individuálně, a to jak z pohledu rozložení měřicích bodů, tak z pohledu nastavení použitých analýz a vyhodnocení.

Z předchozího popisu je rovněž zřejmé, že vyhodnocení tlumení při buzení širokopásmovým náhodným signálem, které by bylo z pohledu času potřebného pro vyhodnocení velmi výhodné, není možné. Praktická ukázka problému je popsána v následujících obrázcích.

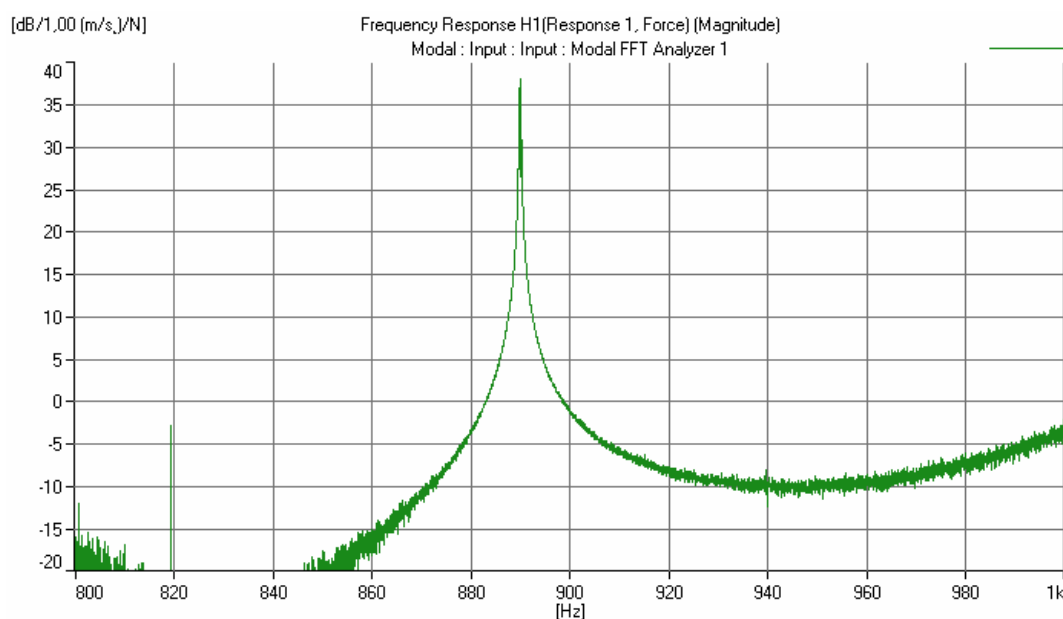


Typickým příkladem takto pořízené frekvenční přenosové funkce je obr.37 na str.59. Grafickým výběrem významné rezonanční špičky byl získán průběh dle následujícího obrázku.



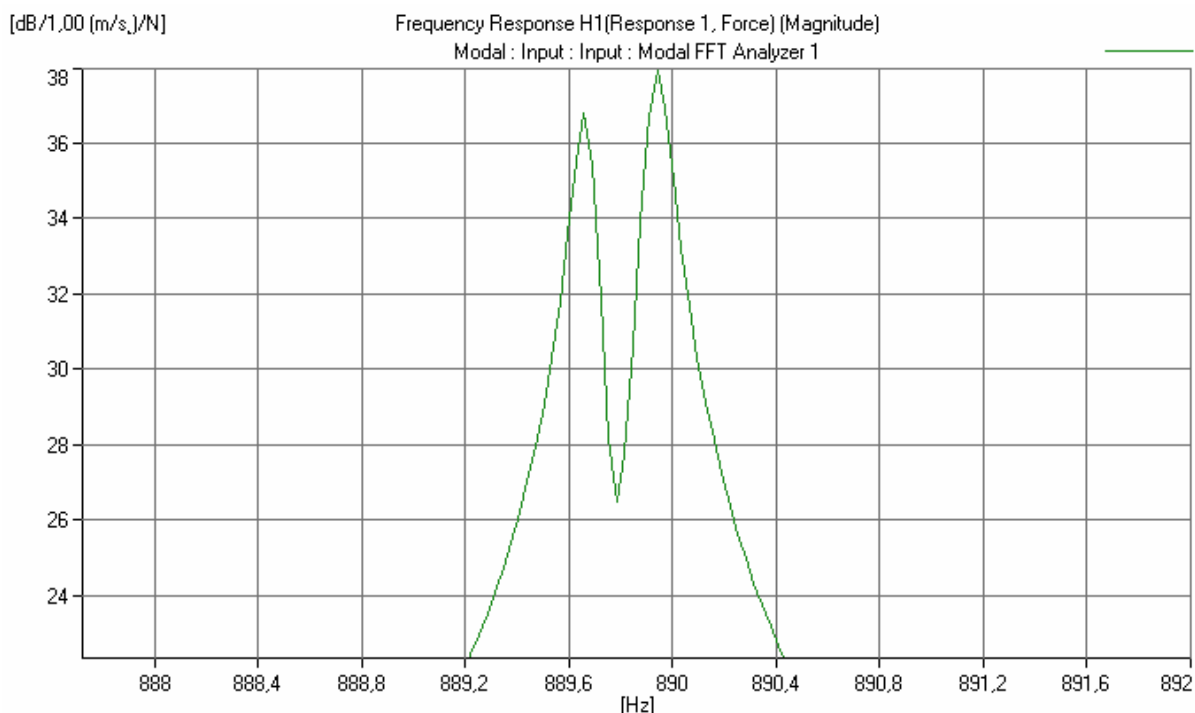
Obr.50: Zoom významné rezonanční špičky pro buzení širokopásmovým náhodným signálem

Pro takto získanou rezonanční špičku byl na základě 3dB poklesu stanoven poměrný útlum 0,0013. Rozlišovací schopnost použité FFT analýzy však nebyla schopna zachytit rozštěpení vlastního tvaru a hodnota zjištěného poměrného útlumu neodpovídá skutečnosti. Pro ověření tohoto tvrzení, stejně jako výše popsanych jevů, bylo provedeno velmi podrobné měření chování frekvenční přenosové funkce v blízkém okolí rezonance za použití FFT analýzy v režimu „zoom“ s vysokým frekvenčním rozlišením.



Obr.51: Frekvenční přenosová funkce v okolí jedné z rezonancí zjištěná pomocí FFT v režimu „zoom“

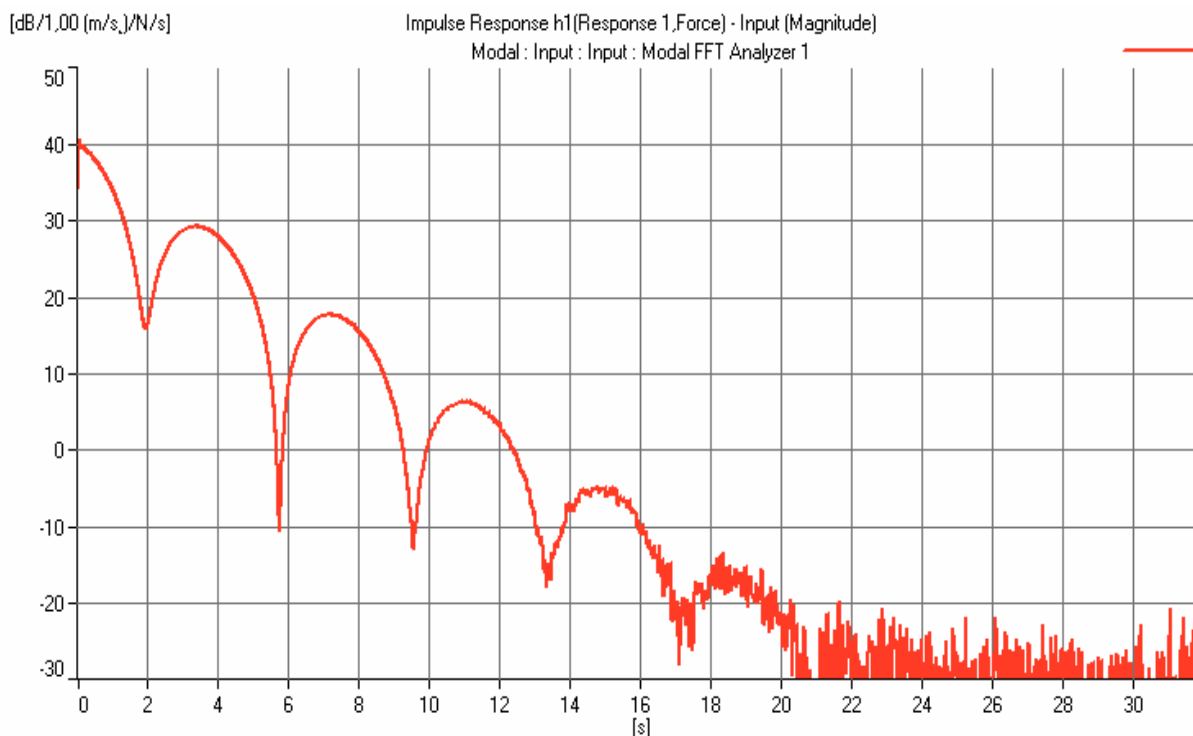
Detailním pohledem na průběh rezonanční špičky je možné posoudit rozdíl ve srovnání s obr.50.



Obr.52: Detailní zobrazení významné rezonanční špičky při aplikaci FFT v režimu „zoom“

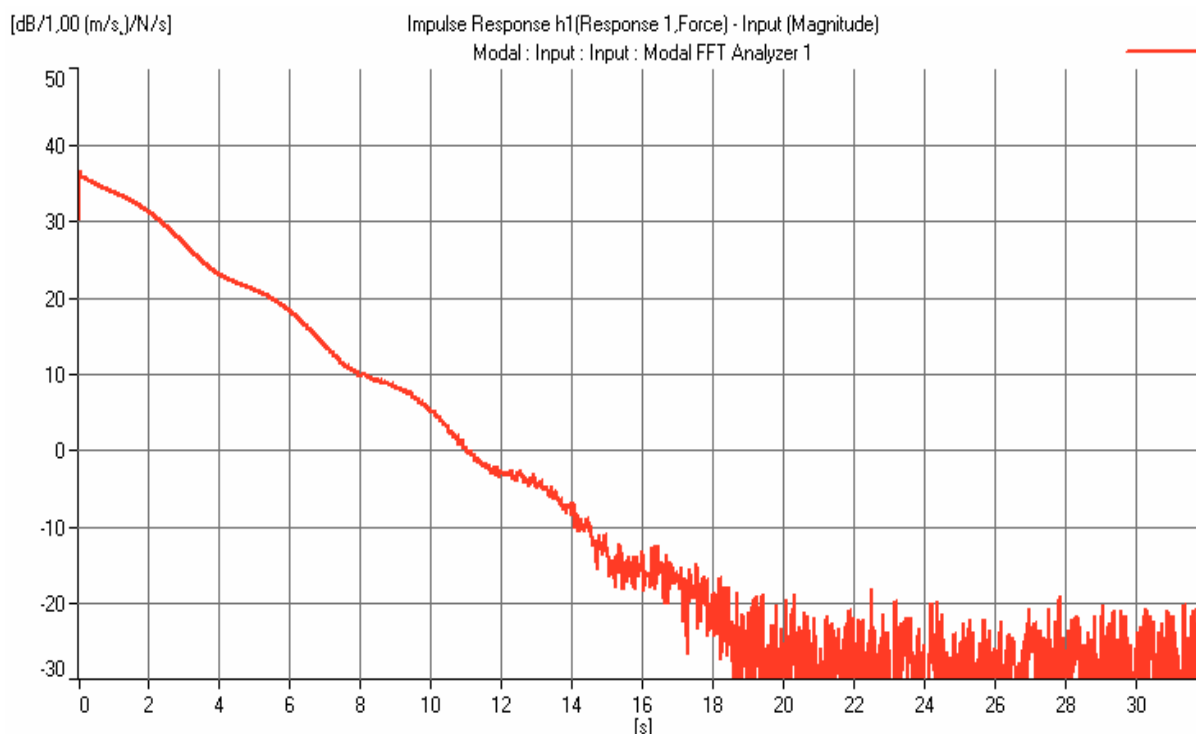
Z obr.52 je na první pohled zřejmé, že u vyšetřovaného vlastního tvaru kmitání došlo k rozštěpení. Pro obě individuální špičky frekvenční přenosové funkce byly odečteny shodné poměrné útlumy o velikosti 0,0007. Tato hodnota již dávala při aplikaci na matematický model dobrou shodu získaných výsledků.

Pro kontrolu bylo na některých vlastních tvarech provedeno rovněž vyhodnocení na základě impulsní odezvy funkce. Základní popis tohoto způsobu vyhodnocení je proveden v kapitole 8.5.2. Na základě této metody bylo rovněž možné potvrdit rozštěpení některých vlastních tvarů kmitání. Typická ukázka impulsní odezvy funkce je obr.53. Periodické rozvlnění impulsní odezvy funkce naznačuje, že v úzkém vyšetřovaném frekvenčním pásmu byly vybudeny oba vlastní tvary kmitání, přičemž doba mezi jednotlivými propady impulsní odezvy funkce je převrácenou hodnotou rozdílu vlastních frekvencí. Z obr.53 je tedy možno pro periodu cca 4s vypočíst rozdíl vlastních frekvencí 0,25Hz. To je zcela v souladu s frekvenční přenosovou funkcí z obr.53, kde byl rozdíl vlastních frekvencí zachycen rovněž na hodnotě 0,25Hz. K vyhodnocení tlumení je však průběh z obr.53 nevhodný. Je zřejmé, že impulsní odezva funkce byla pořízena pro obecný bod měření na železničním kole, který neležel na žádné z pomyslných os symetrie měřeného kola.



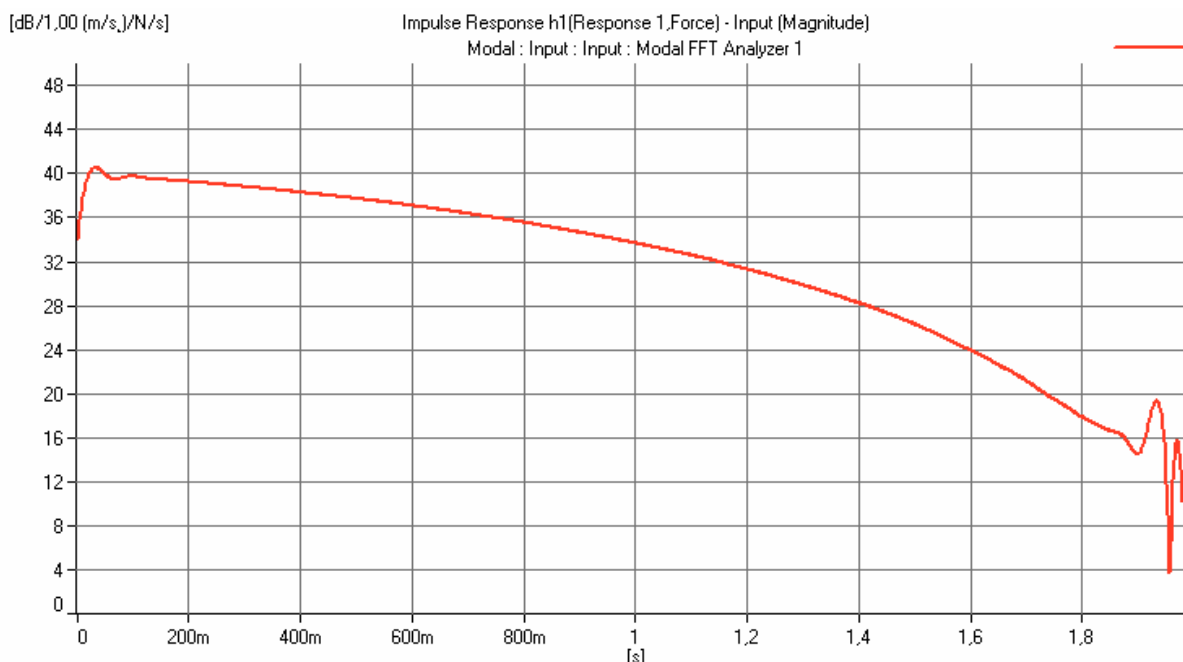
Obr.53: Impulsní odezвовá funkce jednoho z vlastních tvarů se zřejmým rozštěpením

Změnou polohy měřicího akcelerometru byla získána impulsní odezвовá funkce pouze pro jeden z dvojice rozštěpených vlastních tvarů kmitání. Tuto impulsní odezвовou funkci ukazuje obr.54. Z tohoto průběhu již bylo možné odečíst na základě poklesu o 8,7dB poměrný útlum o velikosti 0,0006 a potvrdit tak dosavadní poznatky.



Obr.54: Impulsní odezвовá funkce jednoho z vlastních tvarů s kompenzací rozštěpení

Stanovení tlumení pro některé vlastní tvary kmitání bylo poněkud komplikovanější. Problémy způsobovala zejména doba dozívání, která se směrem k vyšším kmitočtům výrazně zkracovala a v neposlední řadě často velmi malé frekvenční rozdíly mezi „štěpy“ vyšetřovaných vlastních tvarů. Toto se projevilo „prohnutím“ impulsní odezvové funkce.



Obr.55: Impulsní odezvová funkce vlastního tvaru s krátkou dobou dozívání

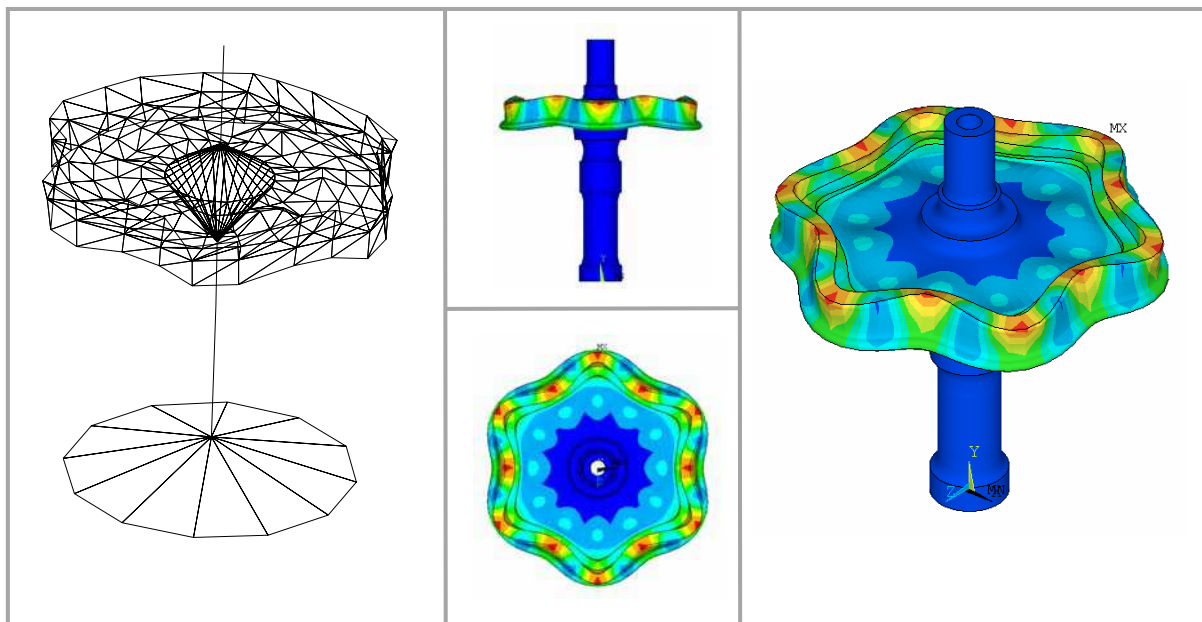
#### 8.5.4 Popis jednoho cyklu verifikační procedury

Posledním krokem v úloze harmonické analýzy byla závěrečná aplikace výše popsaných postupů a ověřených měřicích metod na železničním kole. S ohledem na časovou náročnost řešení, pro každý ověřovaný vlastní tvar kmitání železničního kola, bylo měření provedeno takto:

- Po obvodu věnce železničního kola bylo zvoleno celkem 12 měřicích bodů pro záznam odezvy, což je při známé podobě vlastních tvarů kmitání dostatečné pro bezpečnou lokalizaci.
- Tlumení bylo stanoveno pouze pro ryze radiální a ryze axiální vlastní tvary, které jsou z pohledu hlučnosti železničního kola nejvýznamnější.
- V souladu s předchozím krokem bylo buzení dynamickým budičem provedeno v radiálním a následně také v axiálním směru.
- Pro každý ověřovaný vlastní tvar kmitání byla současně provedena i harmonická analýza matematického modelu za použití parametrů tlumení

zjištěných měření. Následně pak byly srovnány efektivní hodnoty zjištěných zrychlení.

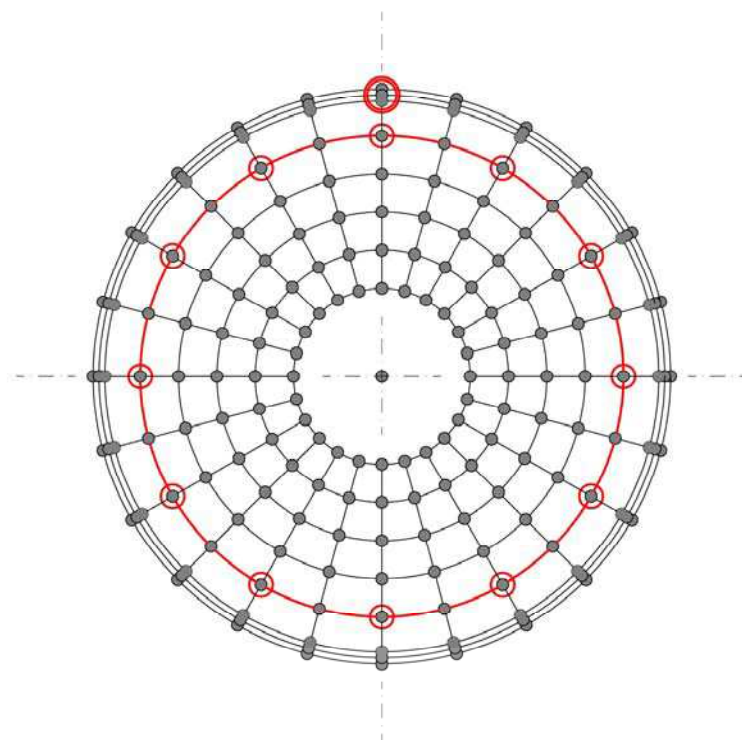
Vhodným příkladem k prezentaci výstupů výše popsaného postupu může být například vlastní tvar kmitání zjištěný na frekvenci 4110Hz. Jedná se o radiální vlastní tvar se šesti uzlovými čarami a jednou uzlovou kružnicí. U tohoto vlastního tvaru byla procentuální hodnota poměrného útlumu stanovena na 0,02%.



Obr.56: Radiální vlastní tvar kmitání železničního kola na frekvenci 4110Hz

Měření bylo ve všech případech provedeno v bodech, které jsou červeně vyznačeny na obr.57. Do 12-ti bodů na červeně vyznačené kružnici byly postupně umístěny snímače zrychlení. Silně vyznačený bod na věnci kola byl použit k aplikaci budicí síly, a to buďto v radiálním nebo axiálním směru, v návaznosti na vyšetřovaný vlastní tvar kmitání.

K buzení měřeného kola byl použit úzkopásmový bílý šum se šířkou pásma 200Hz a středním kmitočtem, který odpovídal vlastní frekvenci vyšetřovaného vlastního tvaru kmitání. *FFT* analýza byla nastavena obdobným způsobem. Naměřená data byla zpracována *FFT* analyzátozem v režimu „zoom“. Šířka pásma pro *FFT* analýzu byla zvolena na 100Hz při celkovém počtu frekvenčních čar 6400. Tyto parametry určují poměrně jemný frekvenční krok (0,016Hz) a vysokou rozlišovací schopnost. Cenou za takto přesné měření a spolehlivě stanovené tlumení, byl extrémně dlouhý čas měření (64s pro každý průměr), přičemž měření v každém z 12-ti bodů bylo provedeno s 10-ti lineárními průměry.



Obr.57: Body použité pro harmonickou analýzu vybrané ze základní měřicí sítě

### 8.5.5 Získané výsledky

Postupem, který byl popsán v předchozím textu, byla pro každý vybraný vlastní tvar kmitání železničního kola sestavena tabulka, která porovnává výsledky měření s výsledky harmonické analýzy provedené na numerickém modelu. Výsledky představují porovnání efektivních hodnot zrychlení zjištěných ve vybraných 12-ti bodech při aplikaci budicí síly o velikosti 1N. S ohledem na rozsah práce jsou v této kapitole prezentovány výsledky pouze jednoho vlastního tvaru kmitání.

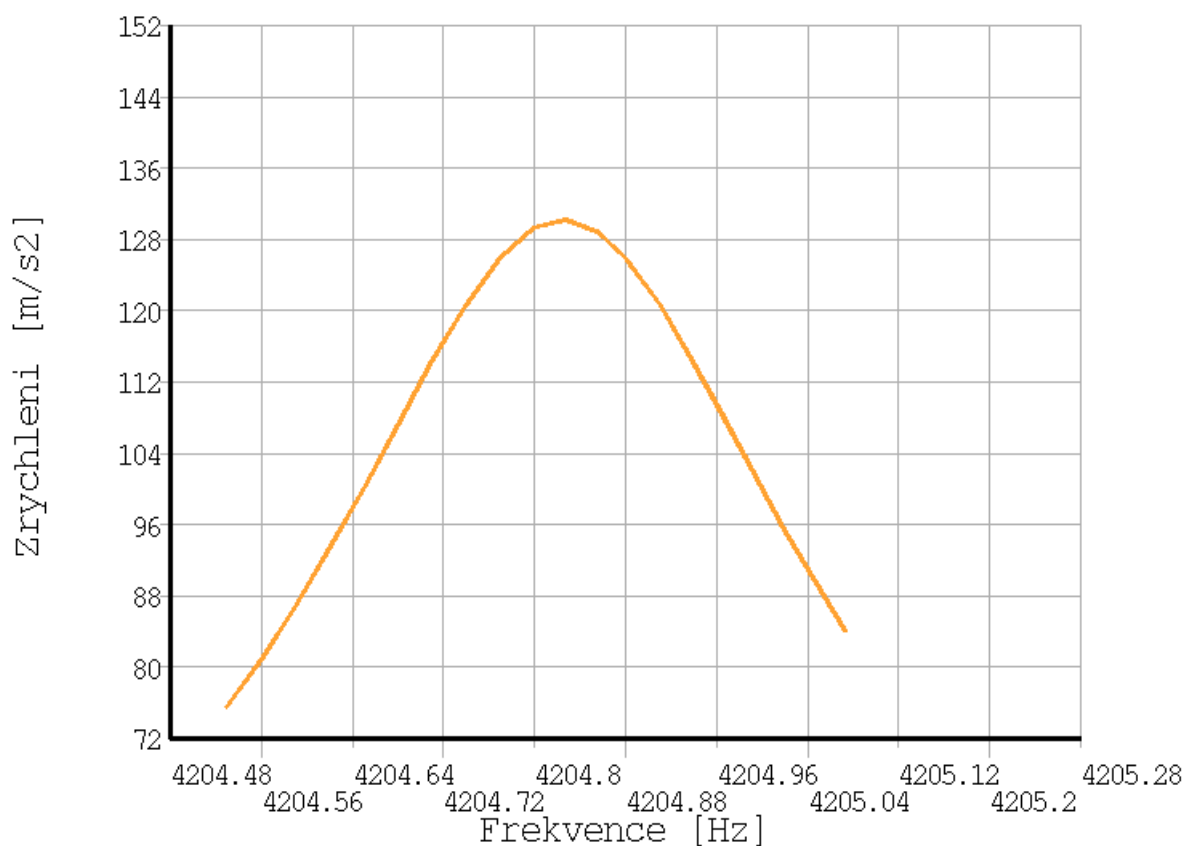
Frekvence vlastního tvaru kmitání			4110Hz
Pořadové číslo vlastního tvaru kmitání			28
Tlumení zjištěné měřením			0,005%
Frekvence zjištěná při harmonické analýze			4111Hz
Poř. č. bodu	Zrychlení [ $\text{ms}^{-2}$ ]		Relativní chyba [%]
	Měření	MKP	
<b>1.</b>	158,5	130,2	17,8
<b>2.</b>	172,1	130,2	24,3
<b>3.</b>	168,9	130,2	22,9
<b>4.</b>	138,2	130,2	5,8
<b>5.</b>	123,1	130,2	5,8

<b>6.</b>	155,9	130,2	16,4
<b>7.</b>	161,7	130,2	19,5
<b>8.</b>	152,9	130,2	14,8
<b>9.</b>	159,8	130,2	18,5
<b>10.</b>	156,2	130,2	16,6
<b>11.</b>	153,2	130,2	15,0
<b>12.</b>	153,7	130,2	15,3
<b>Průměrná relativní chyba [%]</b>			<b>16,0</b>

**Pozn.:** Vypočítaná relativní chyba byla vždy vztažena k naměřené hodnotě.

Tab.9: Výsledky verifikační procedury pro radiální vlastní tvar na frekvenci 4111Hz

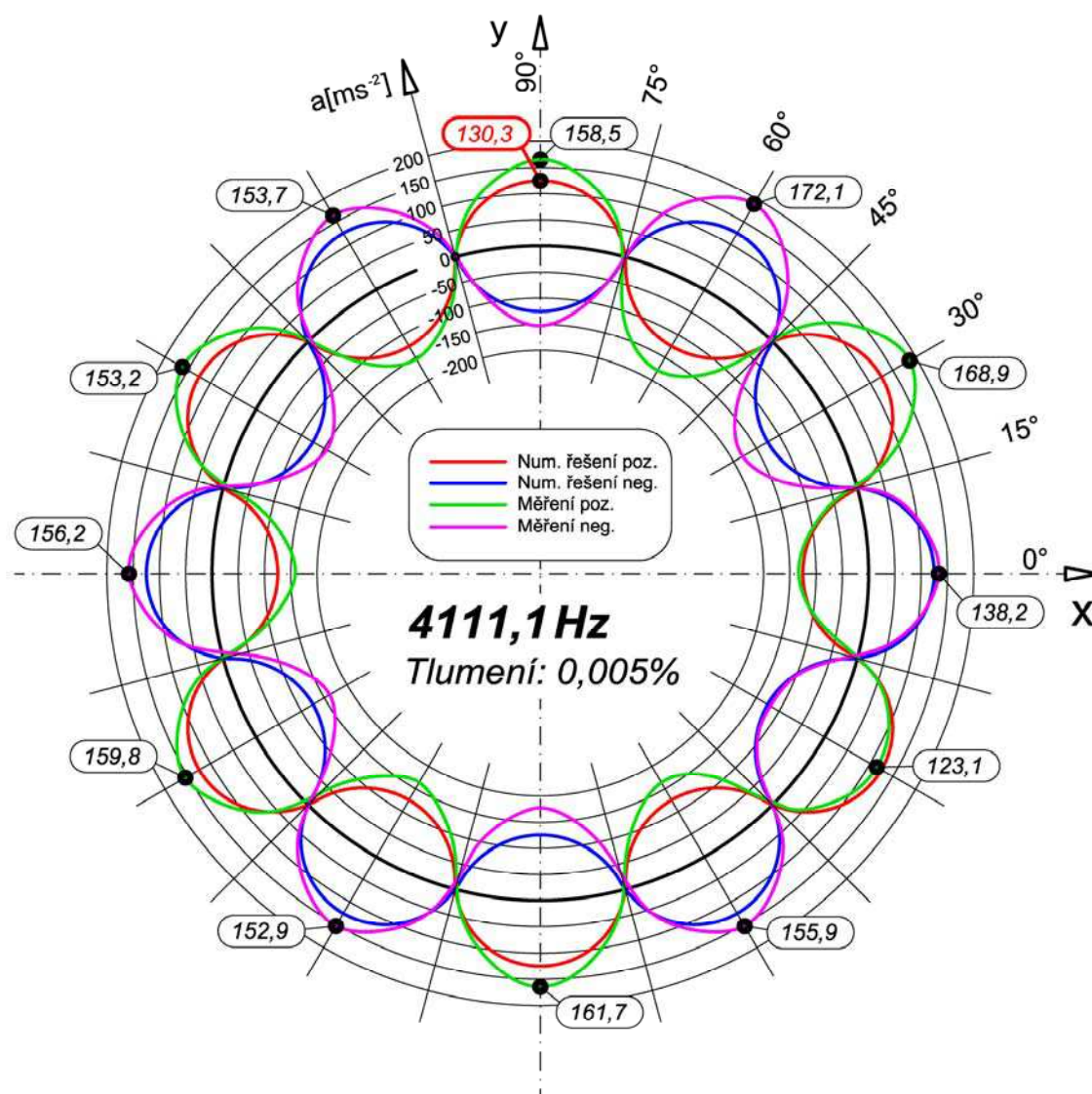
Řešení úlohy harmonické analýzy na připraveném numerickém modelu představovalo v zásadě opakované řešení úlohy s ustáleným harmonickým buzením. Pro každý další krok byla zvolena o něco vyšší frekvence budicí síly. Zpravidla byl volen krok 0,05Hz, pro vlastní tvary kmitání s extrémně nízkou hodnotou tlumení pak 0,01Hz.



Obr.58: Část frekvenčního spektra zrychlení nalezená při harmonické analýze v programu Ansys



Pro každý verifikovaný vlastní tvar kmitání bylo provedeno grafické srovnání výstupů z měření s výsledky matematického modelu. Jako vhodný způsob prezentace byl v tomto případě zvolen polární graf. Aproximace funkcí sinus jednotlivými body měření je možné provést na základě znalosti řešeného vlastního tvaru kmitání, viz obr.56.



Obr.59: Ukázka grafického výstupu verifikační procedury pro řešený vlastní tvar kmitání

Hlavním výsledkem verifikační procedury je skutečnost, že u žádného z vyšetřovaných vlastních tvarů kmitání již nepřekročila relativní chyba mezi měřenými hodnotami a výpočtem 30% a u většiny z nich pak nepřesáhla hodnotu 20%. Z tohoto pohledu lze hovořit o velmi dobře nalaďeném matematickém modelu, a to včetně parametrů tlumení.



## 9 Orientační měření akustiky metodou Beamforming

Pracoviště experimentální hlukové laboratoře katedry mechaniky VŠB-TU Ostrava již řadu let udržuje velmi dobré vztahy s českým distributorem (Spectris Praha spol. s r.o.) měřicí techniky firmy Brüel & Kjær. V období, kdy začaly probíhat první rozvahy nad akustickými měřeními železničního kola, byl do České republiky v rámci prezentace na strojírenském veletrhu v Brně zapůjčen kompletní systém rovinného kruhového mikrofonního pole pro realizaci akustických měření metodou beamforming. Tento systém byl na dobu jednoho týdne, po důkladném zaškolení autora této práce, zapůjčen na pracoviště experimentální hlukové laboratoře VŠB-TU Ostrava. Předpokládaný efekt aplikace výše uvedené technologie byl spatřován zejména v objasnění následujících otázek:

- Budou harmonické budicí síly dodané použitým dynamickým budičem dostatečné k vyvolání měřitelné akustické odezvy?
- Nestane se při vlastním měření dynamický budič sám dominantním zdrojem zvuku, který znemožní lokalizaci zdrojů na měřeném kole?
- Je možné při buzení kola v rezonanci na příslušném vlastním tvaru kmitání nalézt souvislost mezi změřenou hlukovou mapou a deformačním tvarem?

Již na tomto místě je možno konstatovat, že použitý měřicí systém naprosto jednoznačně odpověděl na všechny uvedené otázky v kladném smyslu a významně podpořil smysluplnost záměru provádět na vyšetřovaném železničním kole akustická měření.

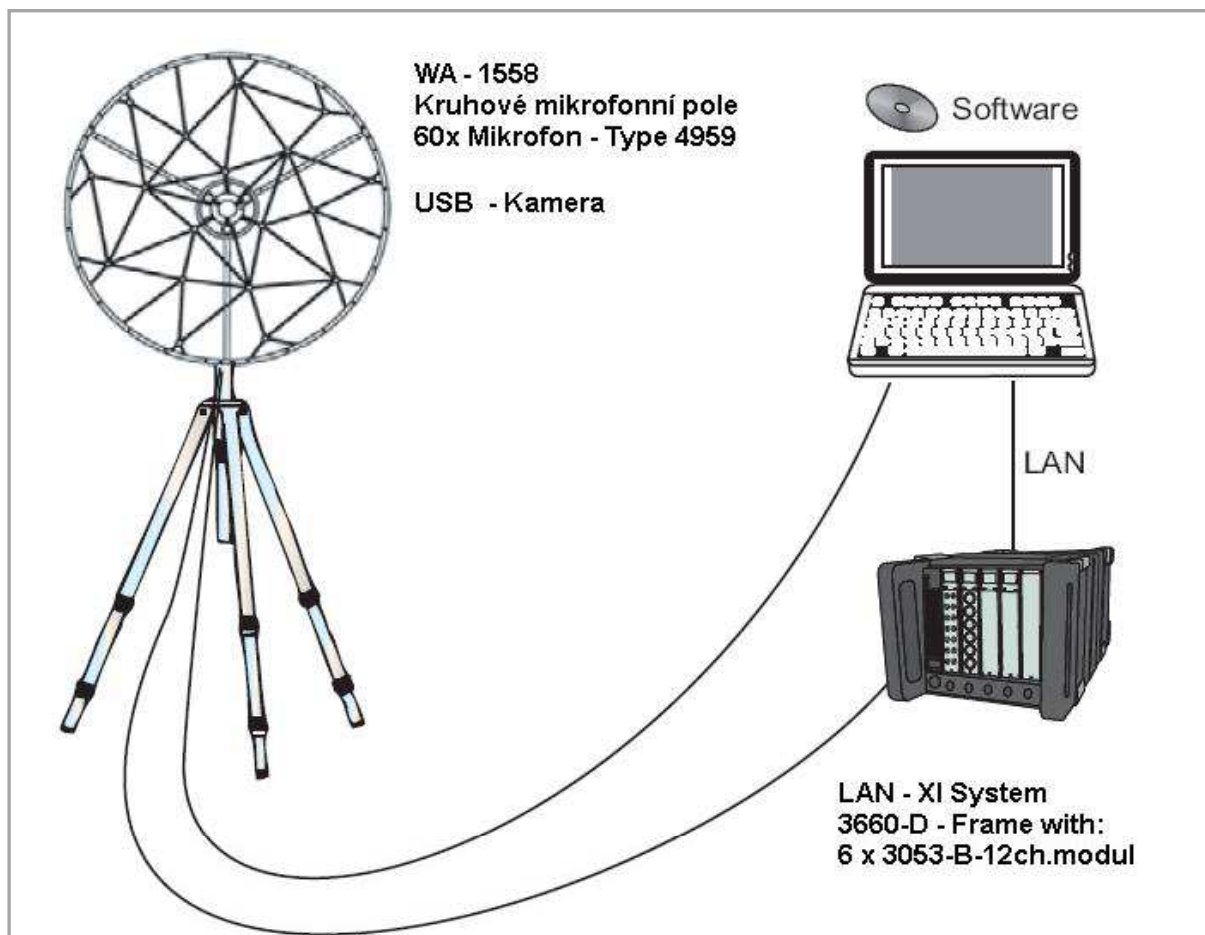
### 9.1 Použitá měřicí technika a postup měření

Zapůjčený systém pro identifikaci zdrojů hluku byl tvořen kruhovým mikrofonním polem s integrovanou kamerou k zachycení obrazu, vícekanálovým signálovým analyzátozem a notebookem s aplikačním softwarem.

#### 1. Zařízení k měření metodou beamforming:

- Kruhové mikrofonní pole s náhodným rozložením mikrofónů o průměru 1m s integrovanou multimediální kamerou B&K – Type WA 1558
- 60ks měřicích mikrofónů B&K – Type 4959
- Multikanálový mikrofonní kabel

- Vícekanálový signálový analyzátor B&K – Type 3660-D (6 x 3053-B-12ch. modul)
- PC s nainstalovaným softwarem B&K PULSE – Beamforming – Type 8608

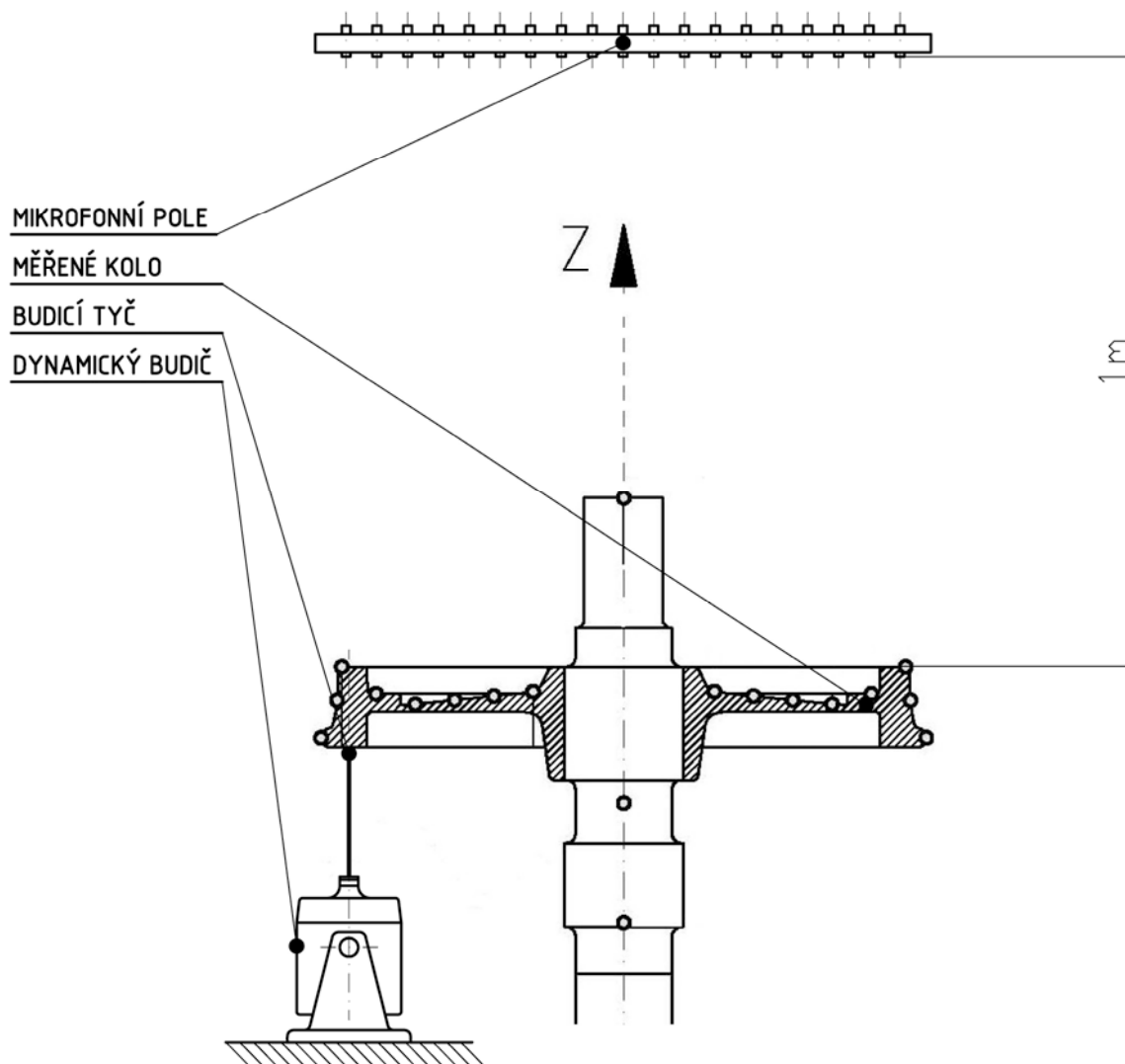


Obr.60: Uspořádání měřicí sestavy pro realizaci akustické holografie metodou Beamforming

## 2. Zařízení k buzení měřeného kola:

- Snímač síly B&K - Type 8200, jmenovitá citlivost 4,07pC/N, SN 1551936
- Nábojový zesilovač B&K - Type 2647 A, S/N 2347603
- Sign. Analyzátor B&K - Type 3560C, (Type 3109, 4/2 kanálový modul)
- Výkonový zesilovač LDS - Type PA100 - E, S/N 880560-374
- Dynamický budič LDS - Type V406, S/N 30251-4
- Ovládací PC B&K - PULSE v.12.0.0, *Lab Shop Modul*
- Signálové a výkonové kabely
- Ostatní pomůcky a příslušenství - Stojan k zavěšení dynamického budiče, budicí tyč, závitové kroužky pro přenos síly, dvousložkové metalické akryluretanové lepidlo, odmašťovací prostředky, svinovací metr.

Vlastní měření bylo provedeno tak, aby nemusely být prováděny žádné zásadní změny v uložení měřeného kola. Kruhové mikrofonní pole bylo proto umístěno nad povrch disku železničního kola do vzdálenosti 1m od povrchu kola. Vzdálenost byla zvolena zejména s ohledem na velikost použitého mikrofonního pole, počet a vzdálenosti mezi mikrofony a v neposlední řadě rovněž ve vazbě na sledovaný kmitočtový rozsah [23], [24]. Dynamický budič byl prostřednictvím budicí tyče připojen ze spodní strany k věncové části železničního kola.

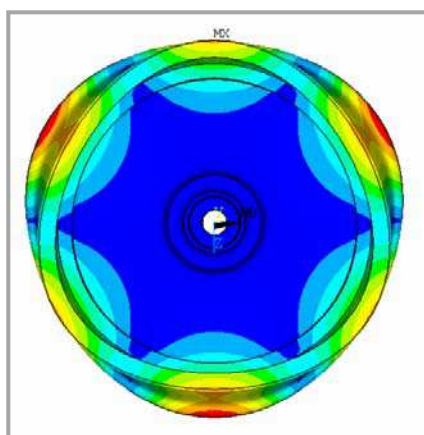


Obr.61: Uspořádání buzení a mikrofonního pole při měření technikou Beamforming

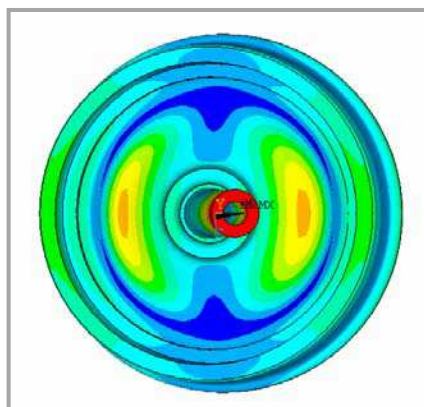
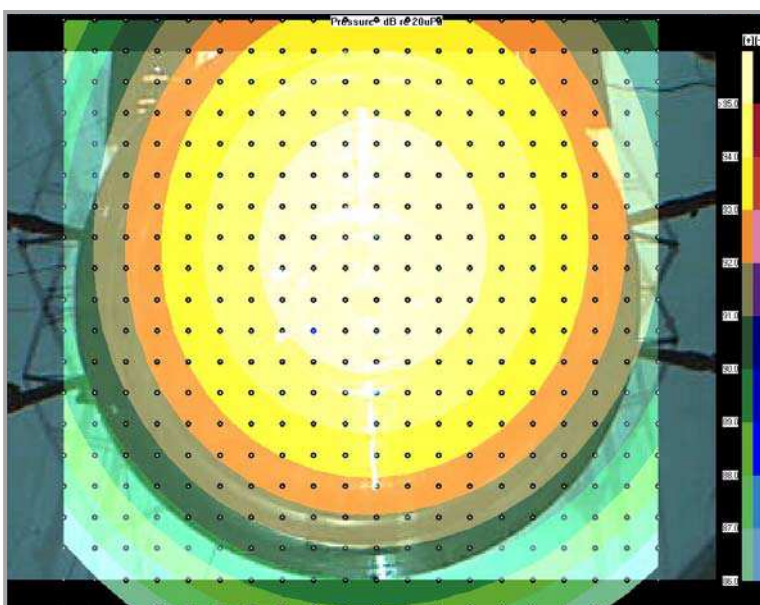
Systém měření byl podobný jako v případě harmonické analýzy s užitím diskretních budících kmitočtů. Kolo bylo vybudeno harmonickým signálem s konstantním kmitočtem na vybraném vlastním tvaru kmitání a po ustálení přechodových jevů bylo provedeno měření akustického prostoru nad měřeným železničním kolem.

## 9.2 Výsledky měření

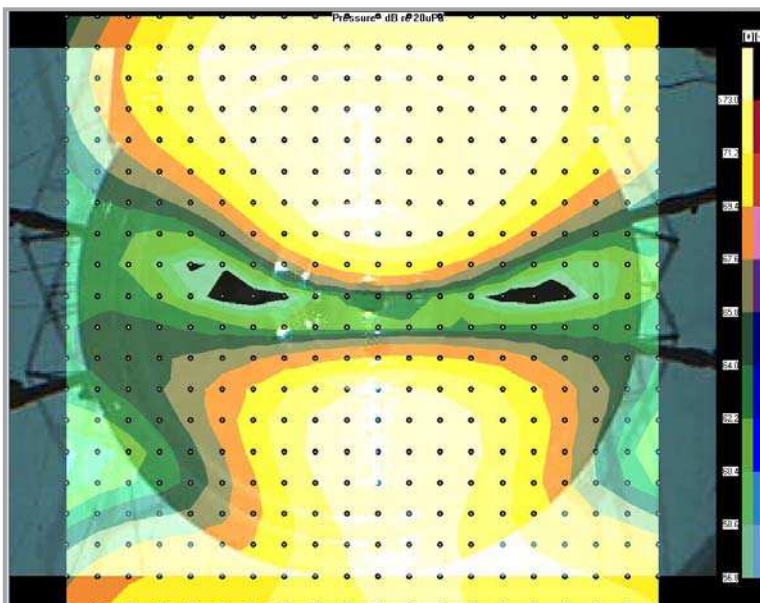
Měření bylo postupně provedeno pro všechny kmitočty, které byly vybrány v tab.8 na str.66. U některých frekvencí se nepodařilo nalézt odpovídající akustickou odezvu, proto nejsou mezi následujícími obrázky uvedeny. Některé vlastní tvary však byly naopak proti původnímu záměru s ohledem na zřetelný akustický projev přidány. Pro snazší orientaci je k hlukové mapě vždy přidán i čelní pohled na měřené železniční kolo v deformovaném stavu, zjištěném pro příslušný budící kmitočet v programu Ansys.



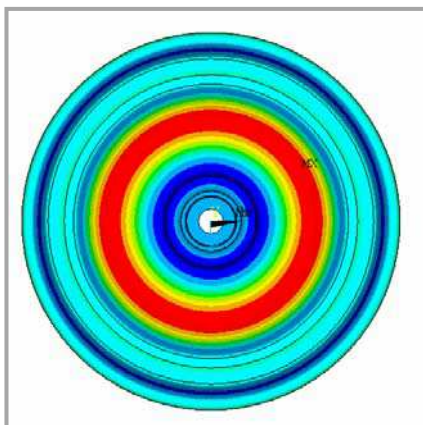
Obr.62: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 889Hz



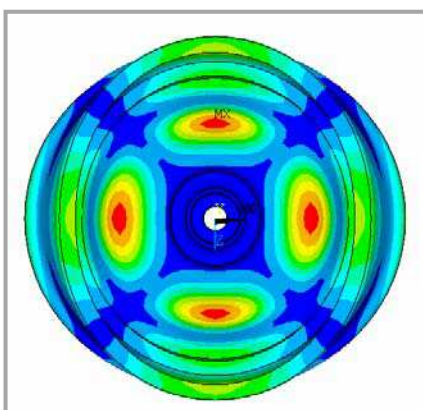
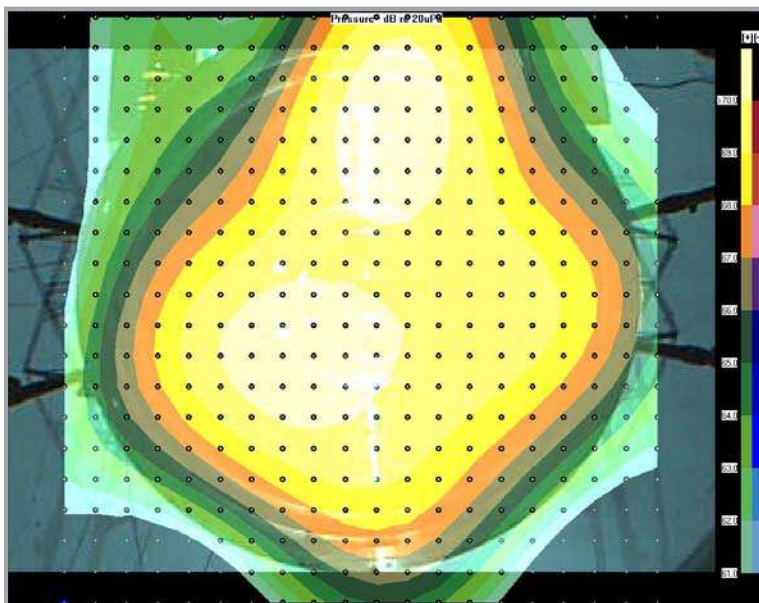
Obr.63: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 1940Hz



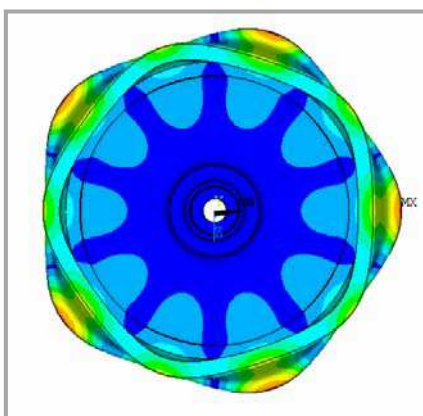
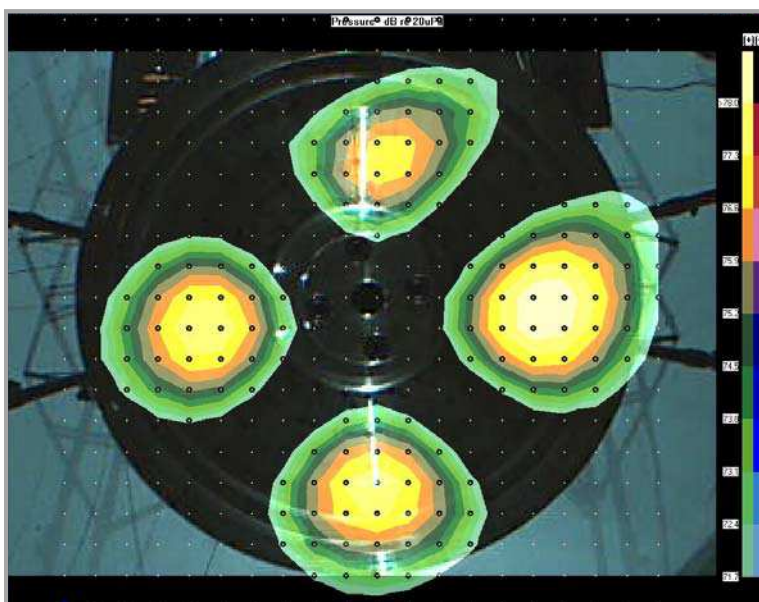




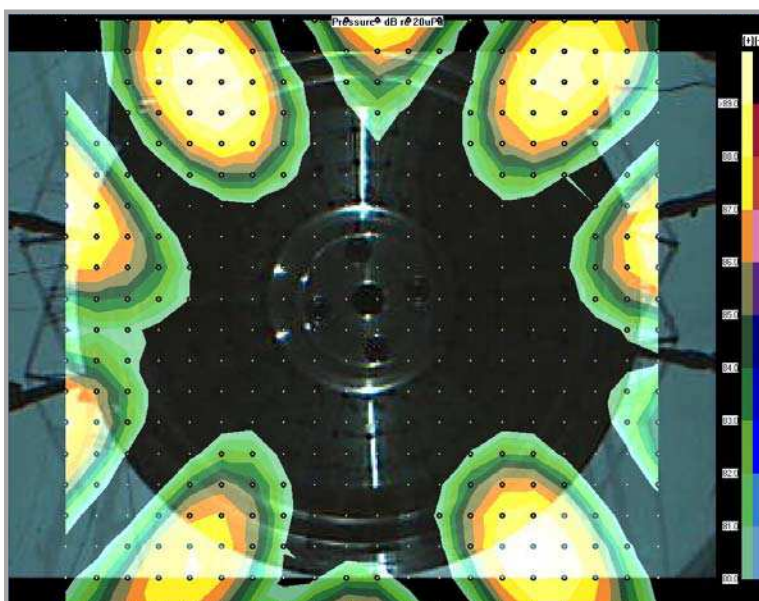
Obr.64: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 2100Hz



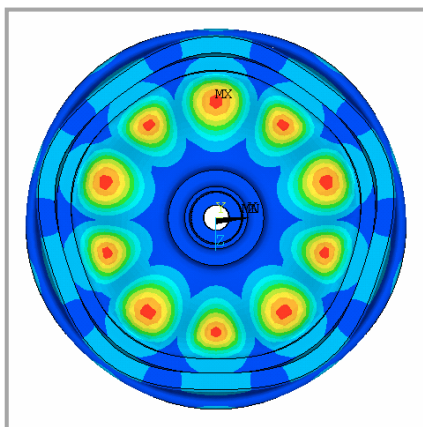
Obr.65: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 2430Hz



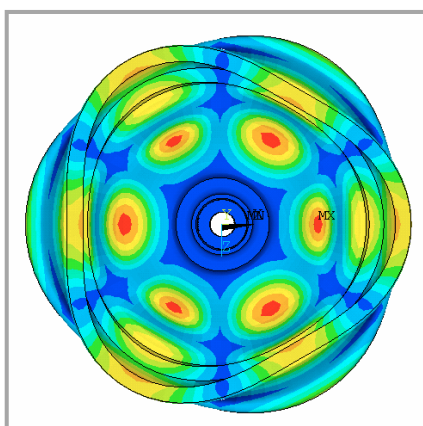
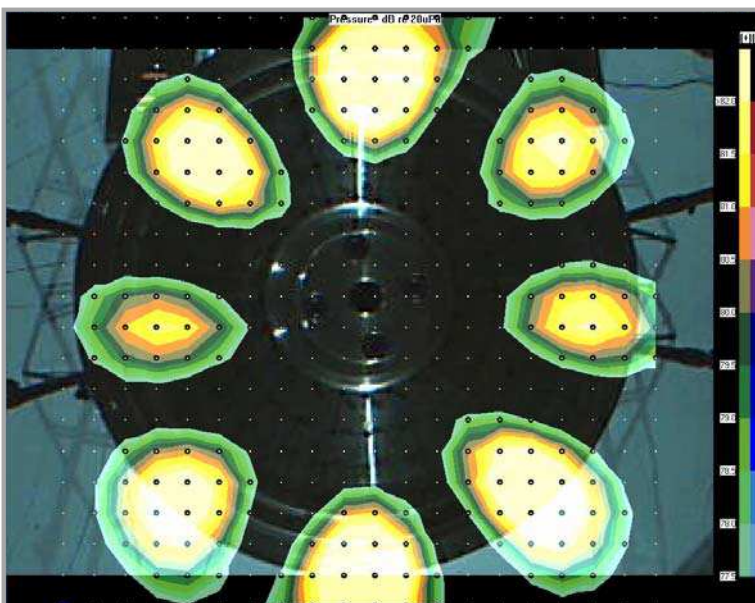
Obr.66: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 2458Hz



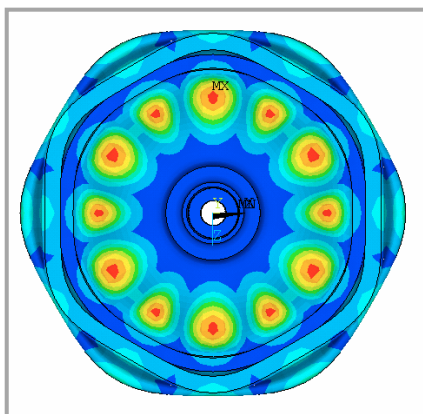
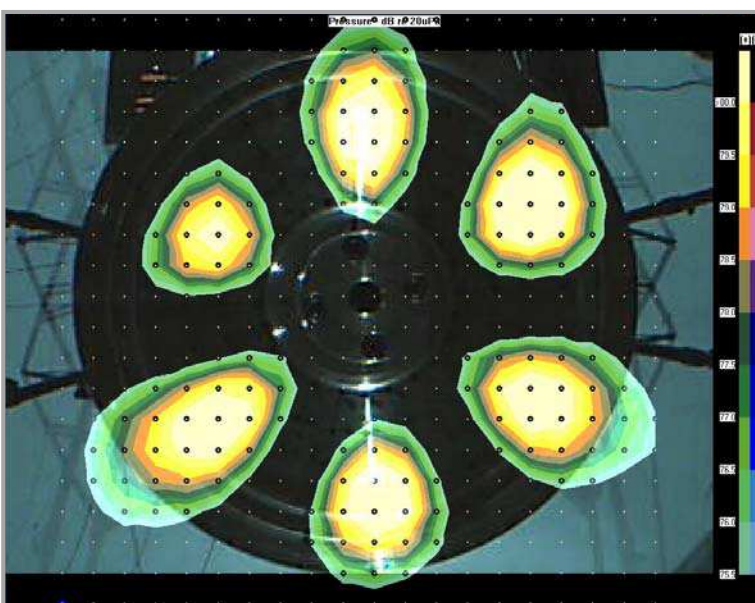




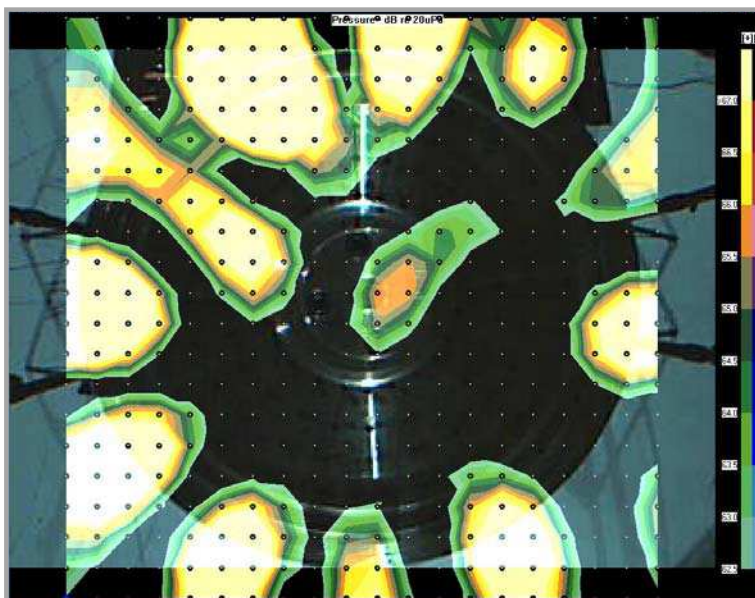
Obr.67: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 2768Hz



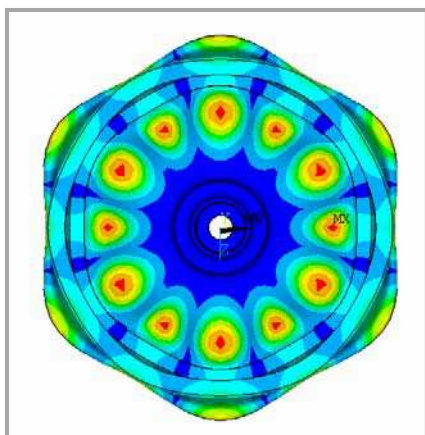
Obr.68: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 2953Hz



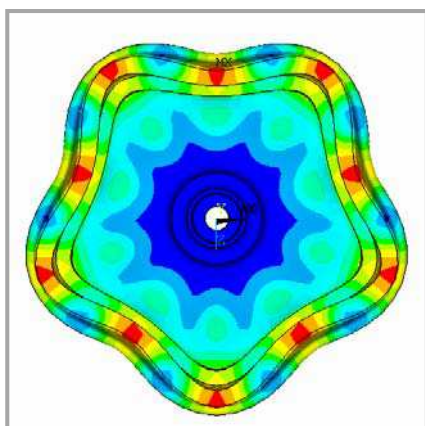
Obr.69: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 3186Hz



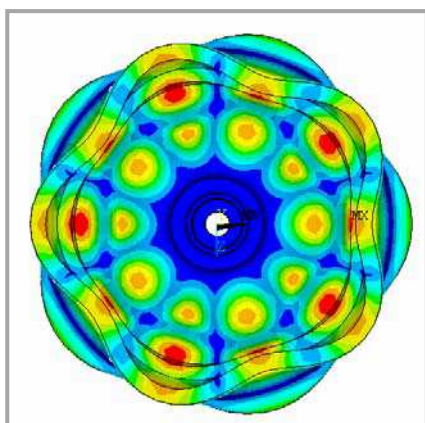
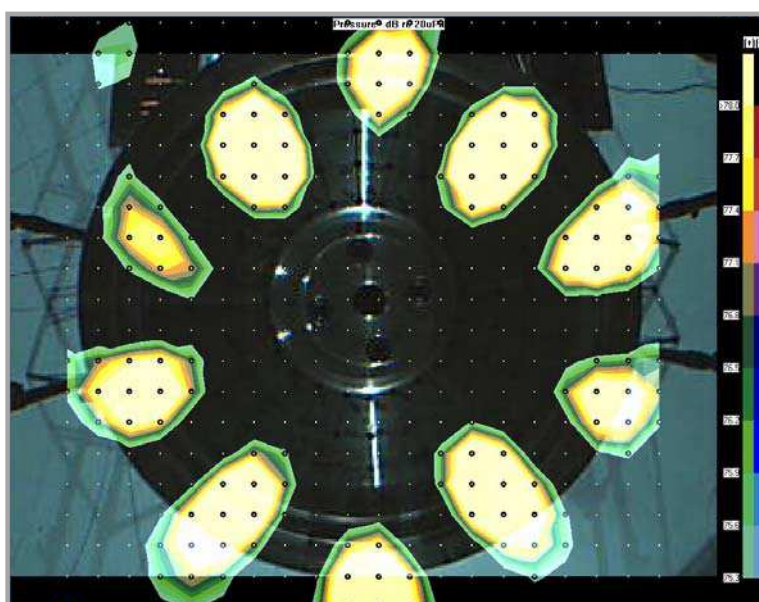




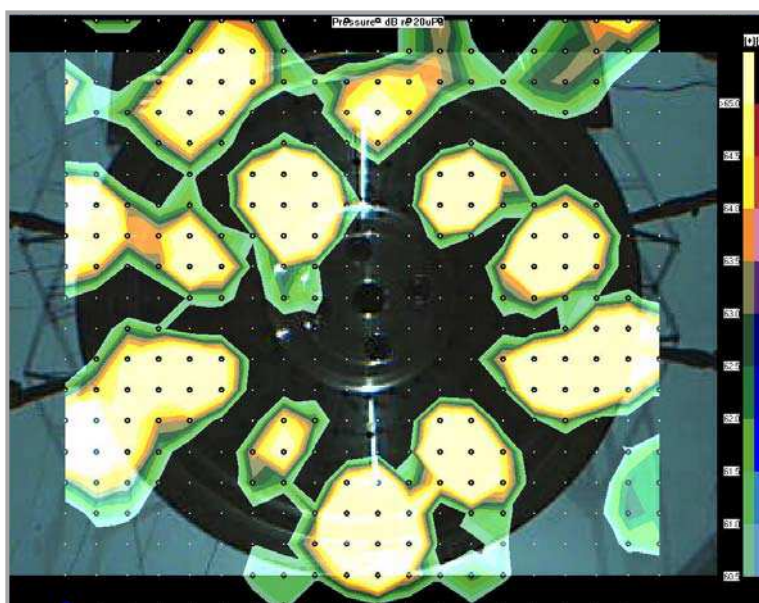
Obr.70: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 3364Hz

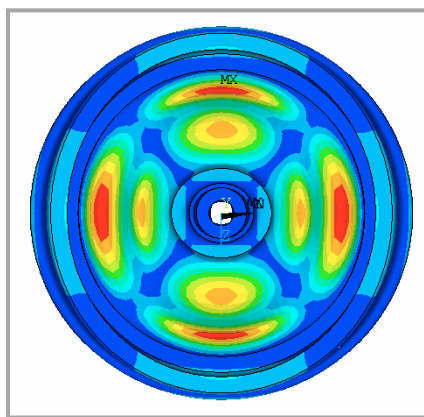


Obr.71: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 3387Hz

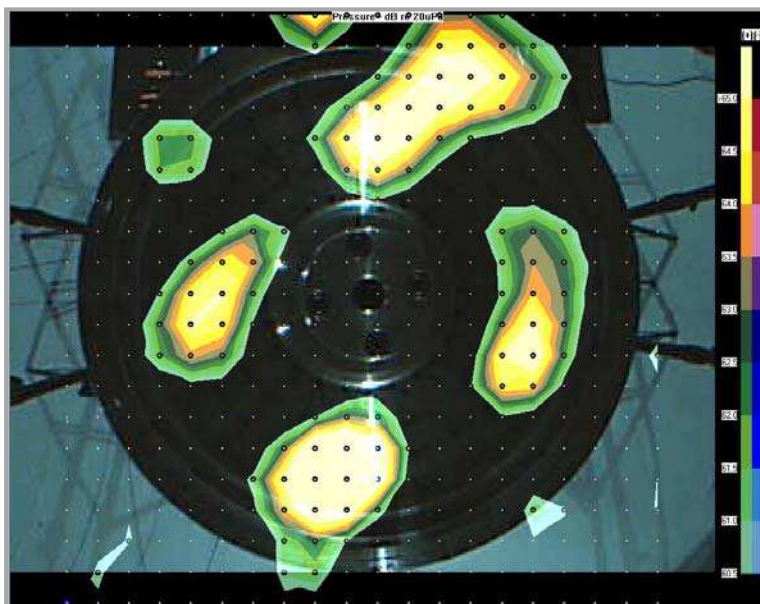


Obr.72: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 4359Hz





Obr.73: Hluková mapa akustického pole nad měřeným kolem při buzení na frekvenci 4570Hz



### 9.3 Poznatky vyplývající z provedeného měření

V úvodní části této kapitoly bylo vysloveno několik otázek, na které bylo po aplikaci výše popsané metody možno odpovědět jednoznačně takto:

- Harmonické budicí účinky byly pro celé vyšetřované frekvenční pásmo dostatečné, akustický projev byl zřetelný, jednoznačný a dobře měřitelný.
- Přestože nebyl použitý dynamický budič nijak zakrytován, nedošlo u žádného z prováděných měření k ovlivnění hlukové mapy železničního kola parazitním hlukem generovaným budičem.
- Měřené kolo bylo při správném vybuzení v rezonanci vždy dominantním zdrojem hluku.
- Dále bylo zjištěno, že pro případy měření s budicími kmitočty vyššími než 2000Hz, resp. vlnovou délku generovaného hluku menší než 0,2m, existuje významná podobnost mezi zjištěným deformačním tvarem železničního kola a stanovenou hlukovou mapou.
- Pro nižší kmitočty se měřené kolo jeví jako jeden zdroj hluku, což pramení jednak z možností použité metody měření a dále z vlastností hlukového pole v oblasti nižších kmitočtů.
- Případná hlubší studie akustických vlastností měřeného železničního kola se z tohoto pohledu jeví jako smysluplná.



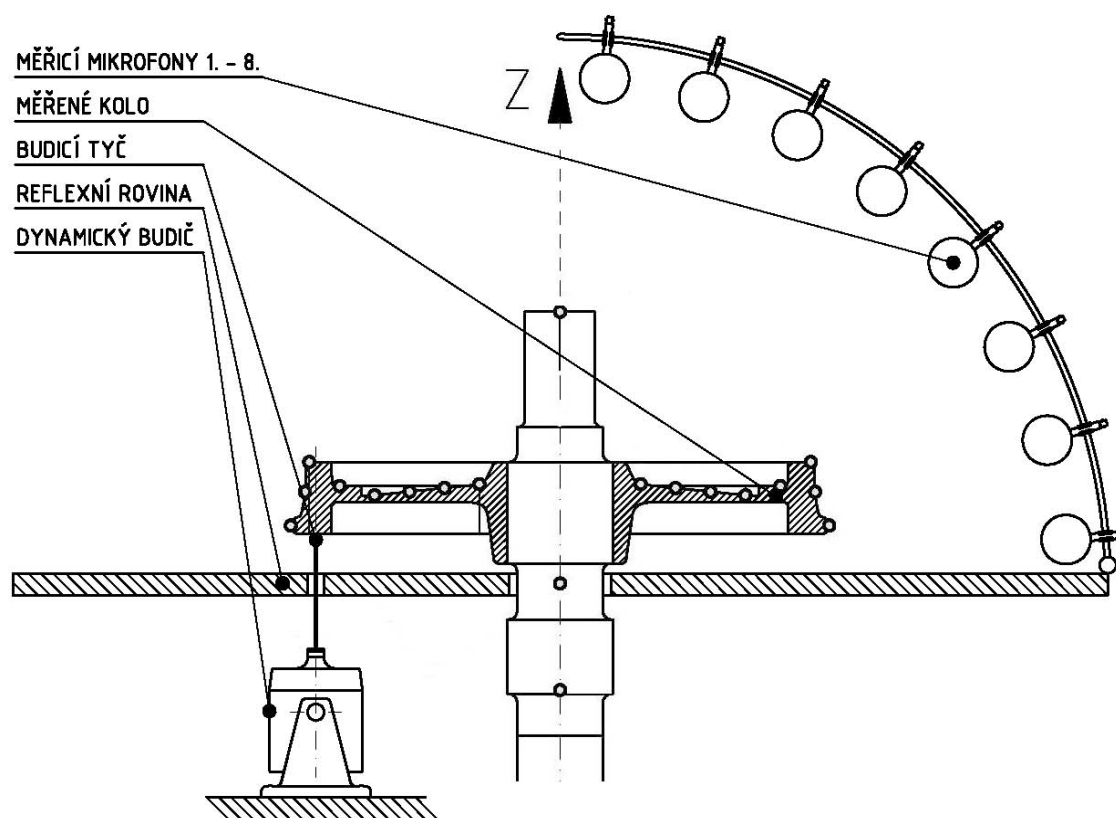
## 10 Akustická měření železničního kola

Za vůbec nejvýznamnější část úlohy spojenou s měřením železničního kola je možno považovat stanovení jeho akustických vlastností, potažmo vyhodnocení účinnosti hlukových tlumičů osazených na železničním kole.

Problematika byla již lehce nastíněna v předchozí kapitole o orientačním měření akustiky metodou Beamformig. Základním atributem provedených akustických měření byla v tomto případě bezesporu polobezodrazová místnost VŠB-TU Ostrava. Referenční akustické prostředí, jehož vlastnosti byly popsány v kapitole 4.3, a dále rozsah stabilně dostupné měřicí techniky, umožnily zformovat základní představy o provedeném měření takto:

- Jako nástroj vhodný k posouzení a vzájemnému porovnání akustických vlastností měřeného železničního kola byla zvolena metoda měření hladiny akustického výkonu nad odrazivou rovinou.
- Stanovení celkové hladiny akustického výkonu, pro každý vyšetřovaný vlastní tvar kmitání, bylo provedeno na základě měření hladin akustických tlaků v bodech tak, aby byly maximálním možným způsobem dodrženy postupy a doporučení uvedené v [15], [16], [17], [18], [19], [20] a [21].
- Ve vazbě na výše citovanou normu bylo nutné pod železničním kolem připravit reflexní rovinu, která nijak neovlivnila dynamické chování železničního kola, ale zajistila potřebný odraz akustické energie vyzařované spodní částí kola a umožnila tak její průchod zvolenou měřicí plochou.
- Pod reflexní rovinou byl umístěn dynamický budič, před jehož akustickými projevy byl měřený prostor reflexní rovinou naopak chráněn.
- Hladiny akustických tlaků byly měřeny na polokulové měřicí ploše pomocí osmi mikrofónů současně vždy pro jeden zvolený úhlový segment.
- Na měřicí ploše bylo zvoleno celkem 18 úhlových segmentů (krok pootočení portálového stojanu 20°).
- Vyzařování akustické energie bylo tedy na měřicí ploše zmapováno celkem ve 144 bodech, což umožnilo kromě výpočtu hladin akustických výkonů i vykreslení poměrně podrobných hlukových map.

Kompletní výkresová dokumentace reflexní roviny, portálového stojanu pro mikrofony a ostatního příslušenství, které bylo pro úspěšnou realizaci měření nutno vyrobit, je součástí příloh této disertační práce.



Obr.74: Schématické znázornění měřeného železničního kola při určování hladiny akustického výkonu

Výsledky, které byly získány v této části disertační práce, jsou z pohledu přínosu pro technickou praxi nejdůležitější. Shrnutí cílů poslední série realizovaných měření na železničním kole lze provést takto:

- Navrhnout smysluplný a opakovatelný experiment, na jehož základě bude možné spolehlivě stanovit hladiny akustických výkonů, vyzařované železničním kolem na diskrétních kmitočtech.
- Experiment by měl maximálním možným způsobem využívat možností hlukové laboratoře VŠB-TU Ostrava a zároveň respektovat obecná doporučení dostupné technické normalizace.
- Sestavit efektivní systém sběru a zpracování naměřených dat tak, aby jej bylo možné operativně použít pro posuzování účinnosti dynamických hlukových tlumičů.

## 10.1 Teoretický rozbor úlohy

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách této práce, základním výstupem provedených měření byla hladina akustického výkonu. Za hlavní výhody použití této veličiny pro posouzení hlučnosti měřeného zdroje lze považovat zejména:

- Akustický výkon, resp. celková hladina akustického výkonu měřeného zdroje, není (ve volném akustickém poli) závislá na vzdálenosti od zdroje hluku.
- Na základě získané hladiny akustického výkonu je možno zpětně stanovit hladinu akustického tlaku v libovolné vzdálenosti od zdroje hluku.
- Při prokázání lineární závislosti mezi budicí silou a měřenou odezvou v podobě hladiny akustického tlaku je možné pro snazší porovnání normovat hladiny akustických výkonů na jednotkovou budicí sílu.

Akustický výkon zdroje lze pro obecnou, spojitou, uzavřenou plochu, obepínající měřený zdroj hluku, vyjádřit následujícím způsobem.

$$W = \oiint_S \vec{I} \cdot \vec{dS} \quad (20)$$

$W$  - akustický výkon stanovený pro obecnou plochu obepínající zdroj zvuku

$\vec{I}$  - akustická intenzita popisující tok akustické energie měřicí plochou

$\vec{dS}$  - elementární orientovaný plošný prvek měřicí plochy

Další úprava vztahu se provede zavedením následujících zjednodušení:

- Měřicí plocha obepínající zdroj bude kulová či polokulová a měřený zdroj bude umístěn v jejím středu.
- Každý měřicí bod zvolený na měřicí ploše bude mít od akustického středu zdroje stejnou vzdálenost.
- Každému měřicímu bodu se přiřadí část měřicí plochy konkrétních rozměrů a součet velikostí těchto ploch musí odpovídat celkové ploše obepínající měřený zdroj.

Vztah pro výpočet akustického výkonu na měřicí ploše pro potřeby měření, odvozený z rovnice (20) má následující podobu:

$$W = I \cdot S = \frac{p^2}{z_0} \cdot S \quad (21)$$

- $I$  - akustická intenzita určená ve zvoleném bodě měřicí plochy,  
popř. průměrná akustická intenzita stanovená pro celou měřicí plochu
- $S$  - velikost části měřicí plochy náležící zvolenému měřicímu bodu  
popř. velikost celé měřicí plochy
- $p$  - akustický tlak určený ve zvoleném bodě měřicí plochy  
popř. průměrný akustický tlak stanovený pro celou měřicí plochu
- $z_0$  - vlnový odpor prostředí

Je obvyklé a hlavně velmi praktické provádět zápis akustických veličin v hladinovém vyjádření. Hladinu akustického tlaku a zbylé navazující veličiny lze určit z obecného vztahu pro hladinová vyjádření [2], [4].

$$L_p = 10 \cdot \log\left(\frac{p^2}{p_0^2}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad (22)$$

- $L_p$  [dB] - hladina akustického tlaku
- $p$  [Pa] - efektivní hodnota akustického tlaku
- $p_0$  [Pa] - referenční hodnota akustického tlaku 0,00002 Pa

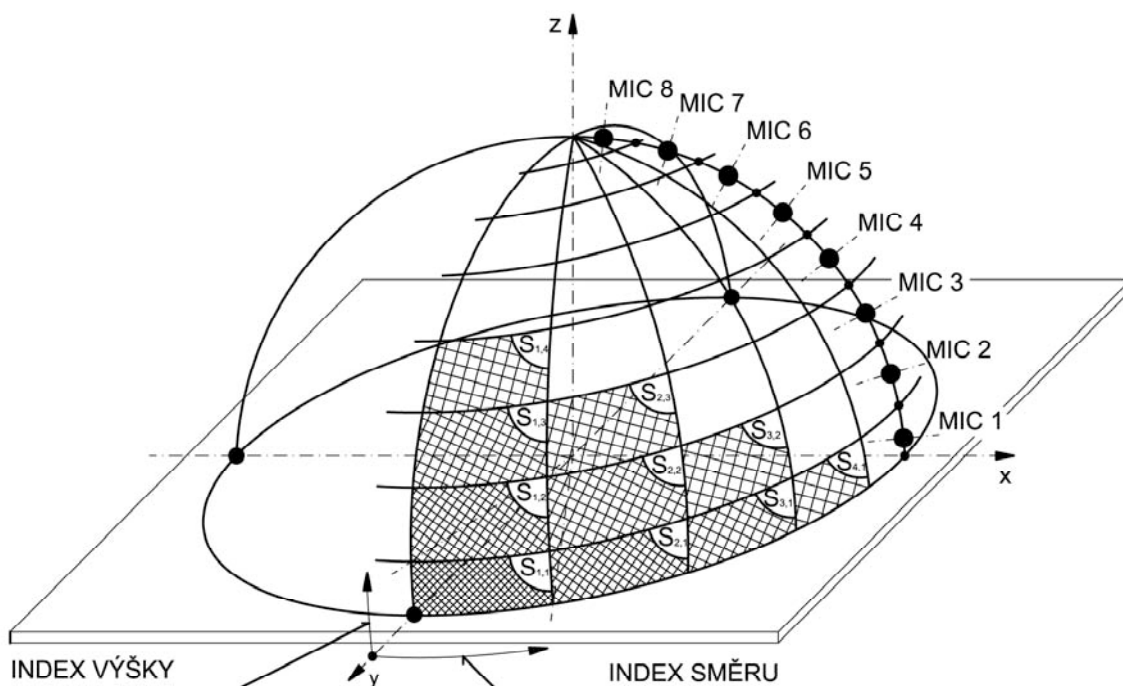
$$L_I = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (23)$$

- $L_I$  [dB] - hladina akustické intenzity
- $I$  [W/m<sup>2</sup>] - efektivní hodnota akustické intenzity
- $I_0$  [W/m<sup>2</sup>] - referenční hodnota akustické intenzity - 1.10<sup>-12</sup> W/m<sup>2</sup>

$$L_W = 10 \cdot \log\left(\frac{W}{W_0}\right) \quad (24)$$

- $L_W$  [dB] - hladina akustického výkonu
- $W$  [W] - efektivní hodnota akustického výkonu
- $W_0$  [W] - referenční hodnota akustického výkonu - 1.10<sup>-12</sup> W

Systém měření znázorněný na obr.74 vedl při potřebě vyhodnocení hladin akustických výkonů na polokulovou měřicí plochu. Tato plocha byla rozdělena sedmi horizontálními (osm měřících mikrofónů) a osmnácti meridiánovými řezy (osmnáct měřících drah s dělením po dvaceti stupních). Takto vzniklo celkem 144 měřících ploch nestejně velikosti, v jejichž geometrických středech bylo provedeno měření hladin akustických tlaků. Schematické znázornění rozdělení měřicí plochy výše uvedenými řezy je znázorněno na obr.75.



Obr.75: Schématické znázornění zvoleného tvaru měřicí plochy a její dělení

Zaznamenávanými údaji, pro každý budicí kmitočet, byly celkové hladiny akustických tlaků změřené ve středech zvolených měřících ploch. Tyto se zároveň staly prvním prezentovatelným výstupem z měření, protože na jejich základě bylo možné sestavit hlukové mapy akustického pole nad železničním kolem. Pro následné stanovení hladiny akustického výkonu však bylo zapotřebí dalších výpočtů. Prvním krokem bylo stanovení průměrné hladiny akustického tlaku na měřicí ploše [13], [19].

$$\overline{L_{Pf}} = 10 \cdot \log \left( \frac{1}{S} \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N S_{(i,j)} \cdot L_{P(i,j)} \right) \quad (25)$$

$\overline{L_{Pf}}$  [dB] - průměrná hladina akustického tlaku na měřicí ploše

$i, j$	-	indexy směru a výšky pro lokalizaci měřicích ploch
$M, N$	-	celkové počty ploch v meridiánovém a obvodovém směru
$S_{(i,j)}$ [m <sup>2</sup> ]	-	povrch části polokulové plochy na pozici $i, j$
$L_{P(i,j)}$ [dB]	-	hladina akustického tlaku na pozici $i, j$
$S$ [m <sup>2</sup> ]	-	celkový povrch polokulové měřicí plochy

Výpočet hladiny akustického výkonu je pak na základě průměrné hladiny akustického tlaku na polokulové měřicí ploše možné vypočítat takto [19].

$$L_W = \overline{L_{Pf}} + 10 \cdot \log \left( \frac{S}{S_0} \right) + C_1 + C_2, \quad (26)$$

$S_0$  [m<sup>2</sup>] - referenční plocha o velikosti 1m<sup>2</sup>

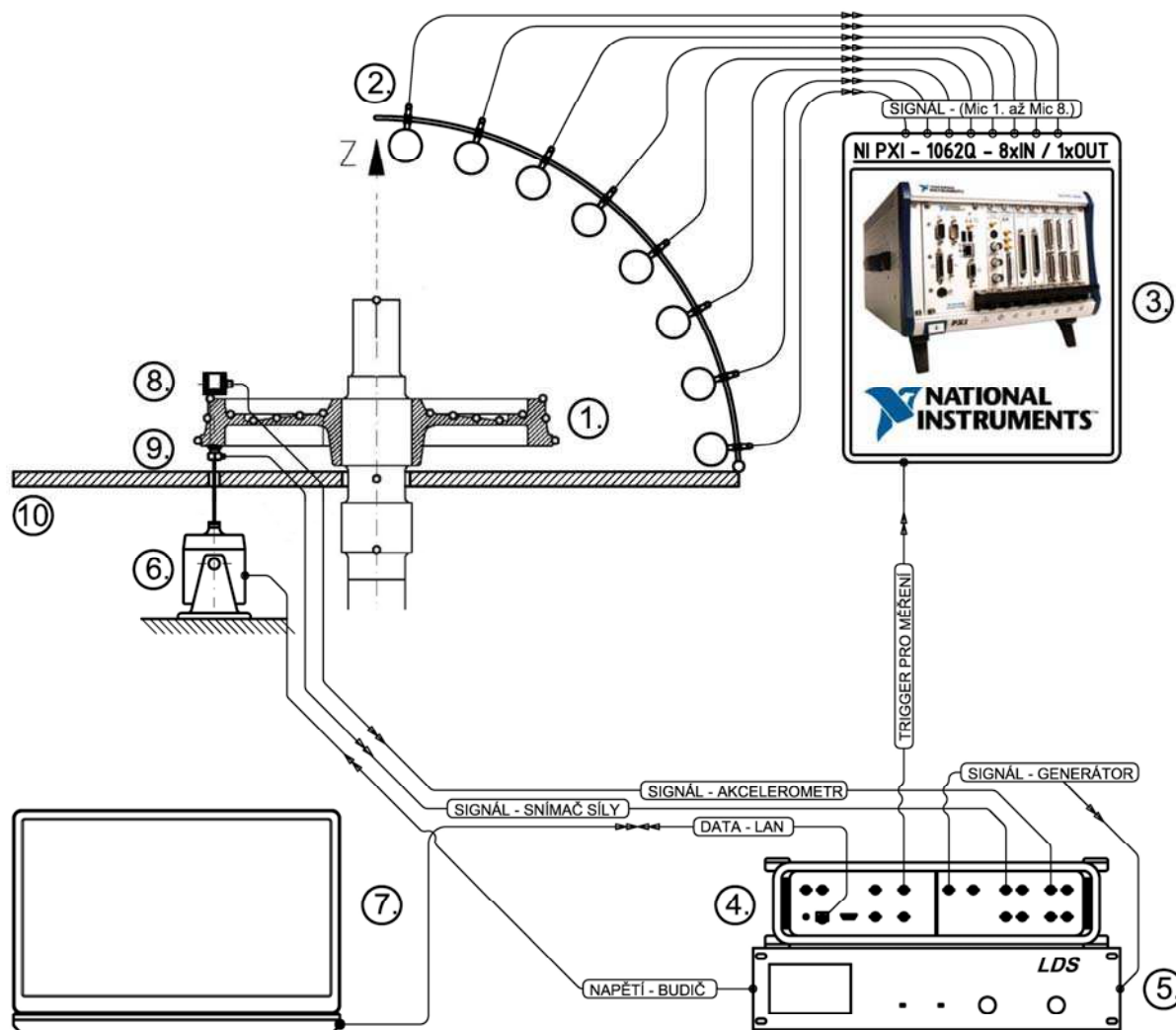
$C_1$  a  $C_2$  jsou příspěvky odchylek meteorologických podmínek měření od referenčních podmínek, za které jsou dle [19] považovány teplota vzduchu během měření 23°C a barometrický tlak 101325Pa.

## 10.2 Systém měření a použitá měřicí technika

K zajištění úlohy měření schématicky naznačené na obr.75, bylo zapotřebí zajistit vícekanálový měřicí systém. Bylo požadováno, aby navržená konfigurace splnila v jenom měřicím cyklu tyto podmínky:

- 8 x měřicí vstup pro měření hladin akustických tlaků (prepolarizovaný měřicí mikrofon)
- 1 x měřicí vstup k zajištění měření budících silových účinků (snímač síly)
- 1 x měřicí vstup pro kontrolní měření vibrací na povrchu železničního kola (akcelerometr), pro výpočet koherence mezi budicí silou a odezvou měřeného kola. Systém by měl odhalit zejména problémy s budicí tyčí, uchycením snímače síly apod.
- 1 x napěťový výstup generátoru pro výrobu budícího harmonického signálu s definovanou úrovní a frekvencí
- V případě, že by bylo použito více měřicích zařízení, umožnit vzájemnou synchronizaci minimálně na úrovni společného spuštění jedním spouštěcím podnětem.

Pro splnění výše uvedených podmínek, byl použit jednak již osvědčený čtyřkanálový analyzátor *B&K Pulse* a nově dále dvanáctikanálový analyzátor *National Instruments*.



Obr.76: Systém vzájemného propojení použité měřicí techniky

1. Měřená soustava železničního kola s osou a základ
2. Portálový rám s měřicími mikrofony
  - 8 x B&K - Type 4198 A 021, Prepolarizovaný mikrofón, jmenovitá citlivost 50 mV/pa, S/N 2621987 ÷ S/N 2621994
3. Dvanáctikanálový analyzátor NI
 

– NI	– NI PXIe - 1062Q	Šasí
– NI	– NI PXIe - 8130	Kontrolér
– 3 x NI	– NI PXI - 4462	Čtyřkanálové měřicí moduly
4. Čtyřkanálový analyzátor B&K - Pulse

- 
- B&K - Type 3560C, univerzální vysokorychlostní analyzátor, S/N 2348762
  - B&K - Type 3109, 4/2 kanálový modul
  - B&K - Type 7533, modul síťového rozhraní
5. Výkonový zesilovač
- LDS - Type PA100 - E, S/N 880560-374
6. Dynamický budič
- LDS - Type V406, S/N 30251-4
7. Notebook
- Notebook Fujitsu Siemens, procesor Intel centrino duo, 2048 MB RAM
8. Akcelerometr
- B&K - Type 4507 B 001, DeltatTron Akcelerometr, jmenovitá citlivost 1,010 mV/ms<sup>-2</sup>, S/N 10171
9. Snímač síly
- B&K - Type 8200, jmenovitá citlivost 4,07pC/N, SN 1551936
10. Signálové a výkonové kabely
11. Ostatní pomůcky a příslušenství
- Stojan k zavěšení dynamického budiče
  - Mikrofonní kalibrátor (B&K - Type 4231, S/N 2734162)
  - Budicí tyč
  - Závitové kroužky pro přenos síly
  - Dvousložkové metalické akryluretanové lepidlo
  - Technický vosk k upevnění snímače zrychlení
  - Odmašťovací prostředky
  - Svinovací metr



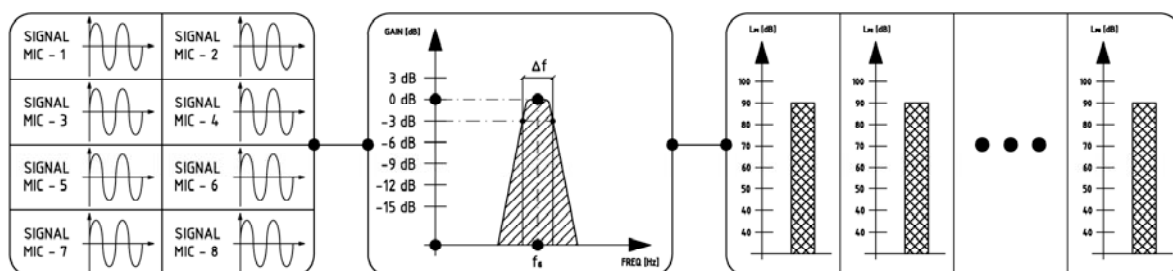
### 10.3 Sběr a zpracování naměřených dat

Ke generování budicího harmonického signálu, měření síly a kontrolnímu měření vibrací na povrchu železničního kola byl použit vícekanálový analyzátor *B&K Pulse*, kompletně ovládaný z projektu sestaveného obvyklým způsobem v prostředí *Pulse LabShop*. Obdobné projekty byly sestaveny již pro řešení úlohy harmonické analýzy, proto není nutné podrobně popisovat základní architekturu projektu.

#### 10.3.1 Nástroj pro měření hladin akustických tlaků

Novinkou při porovnání s předešlými úlohami byl paralelní provoz vícekanálového analyzátoru *National Instruments*. Analyzátor byl použit pro sběr dat z osazených měřicích mikrofónů. Aby bylo možno uvedený analyzátor využít k výše popsanému účelu, bylo zapotřebí připravit měřicí program v prostředí *LabView*. Funkce připraveného programu je možno shrnout v těchto bodech:

- Je umožněna standardní kalibrace mikrofónu harmonickým signálem s frekvencí 1000Hz a hladinou akustického tlaku 94dB.
- Měřené signály jsou upraveny filtrem typu pásmová propust s jednotkovým zesílením na středním kmitočtu filtru. Toto opatření zásadním způsobem eliminuje chyby měření vzniklé záznamem hluku pozadí, vyšších harmonických složek apod.
- Nastavení střední frekvence pásmové propusti a frekvenční šířky propuštěného pásma probíhá automaticky po zadání budicího kmitočtu v prostředí *Pulse LabShop*.
- Za pásmovými propustmi jsou již jednotlivé signály zpracovávány a průměrovány analyzátořem celkové hladiny a to lineárně po dobu 30s.
- Po uplynutí nastavené doby průměrování je možno pořízené celkové hladiny akustických tlaků zapsat do výstupního textového souboru.



Obr.77: Systém řazení jednotlivých nástrojů při měření hladin akustických tlaků

Popis činnosti celého měřicího systému, resp. sled jednotlivých kroků, je shrnut v následujícím postupu.

- a) Spuštění projektu v aplikaci *Pulse LabShop*, inicializace, kontrola osazených vstupů.
- b) Spuštění měřicího programu v prostředí *LabView*, inicializace, kontrola osazených vstupů.
- c) Kalibrace osazených mikrofonů.
- d) Nastavení budicího kmitočtu signálového generátoru, spuštění generátoru a vyčkání na ustálený stav kmitání měřeného kola.
- e) Start měření - měření budicí síly, zrychlení na povrchu kola a měření hladin akustických tlaků.
- f) Kontrola naměřených výsledků, ověření koherence, zápis naměřených dat do výsledkového souboru.
- g) Pootočení portálového stojanu do další pozice, dále pokračování od bodu d).

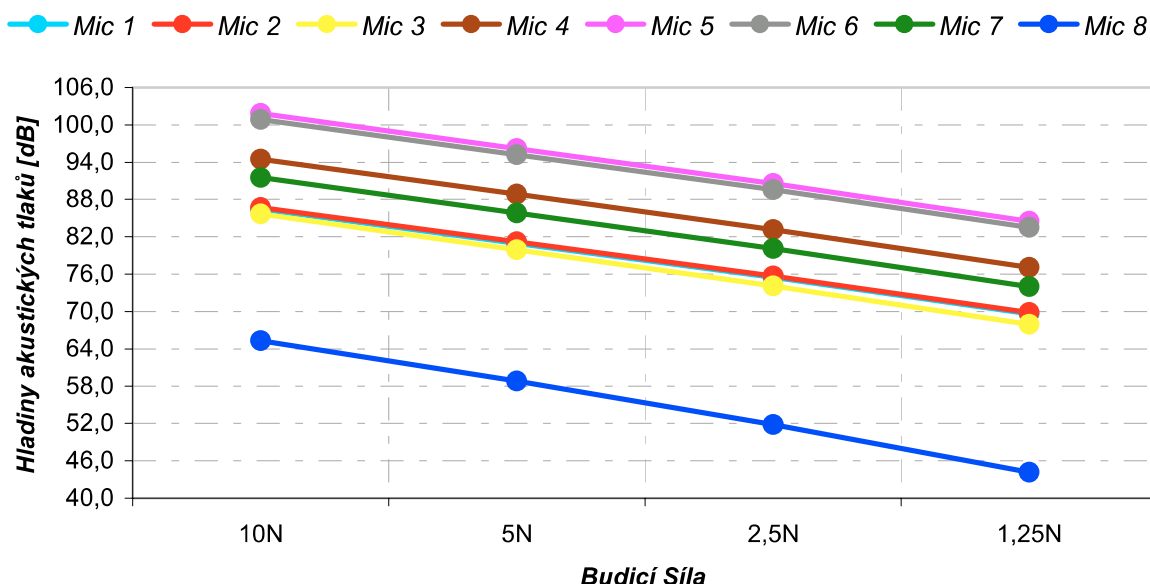
Po změření všech měřicích drah pro buzení jedním kmitočtem byl vždy uložen výsledkový soubor. Výsledkovým souborem se rozumí textový dokument s názvem, který definuje budicí kmitočet (např. *889HZ.TXT*). Obsahem výsledkového souboru je matice o osmnácti řádcích a devíti sloupcích. První sloupec matice jsou efektivní hodnoty změřených budicích sil pro jednotlivé polohy portálu s přesností na dvě desetinná místa, v dalších sloupcích jsou pak uloženy celkové hladiny akustických tlaků s přesností na jedno desetinné místo.

<b>889HZ.TXT</b>						
$F_{(1)}$	$Lp_{(1,1)}$	$Lp_{(1,2)}$	$Lp_{(1,3)}$	- - -	$Lp_{(1,8)}$	$Lp_{(1,9)}$
$F_{(2)}$	$Lp_{(2,1)}$	$Lp_{(2,2)}$	$Lp_{(2,3)}$	- - -	$Lp_{(2,8)}$	$Lp_{(2,9)}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
$F_{(17)}$	$Lp_{(17,1)}$	$Lp_{(17,2)}$	$Lp_{(17,3)}$	- - -	$Lp_{(17,8)}$	$Lp_{(17,9)}$
$F_{(18)}$	$Lp_{(18,1)}$	$Lp_{(18,2)}$	$Lp_{(18,3)}$	- - -	$Lp_{(18,8)}$	$Lp_{(18,9)}$

Tab.10: Tabulkové zobrazení uspořádání výsledkového souboru

Posledním krokem, provedeným před vyhodnocením hlukových map a následným výpočtem hladin akustických výkonů, bylo normování naměřených hladin akustických tlaků na jednotkovou budicí sílu. Hlavní výhodou tohoto opatření bylo zvýšení přehlednosti a vzájemná porovnatelnost vypočtených hladin akustických výkonů.

Kontrolní měření zaručující linearitu přenosu harmonické budicí síly na akustický tlak bylo provedeno pro několik měřicích drah a budicích kmitočtů, a to tak, že efektivní hodnota budicí síly byla volena postupně v úrovních 10N, 5N, 2,5N a 1,25N. Při každém snížení budicí síly na polovinu předešlé hodnoty klesla hladina akustického tlaku na každém z měřicích mikrofónů o 6dB, což potvrzuje, že je úloha v této oblasti buzení lineární.



Obr.78: Grafické znázornění dat získaných při ověřování linearity přenosu pro buzení na kmitočtu 889Hz

Veškerá data z ověřování linearity přenosu, stejně jako data z měření hladin akustických tlaků, jsou součástí digitálních příloh této práce. Vlastní výpočet normované hladiny akustického tlaku byl již poměrně snadný. Vyjádřením akustického tlaku z rovnice (22) dostaneme:

$$p_{(i,j)} = p_0 \cdot 10^{\frac{L_{P(i,j)}}{20}} \quad (27)$$

Vlastní normování pak bylo provedeno dle vztahu:










$$p_{N(i,j)} = \frac{p_{(i,j)}}{F_{(i)}} \quad (28)$$

Výpočet normované hladiny akustického tlaku byl proveden dosazením vypočtených normovaných akustických tlaků  $p_{N(i,j)}$  do rovnice (22). Výstupem procesu pak byly upravené výsledkové soubory obsahující normované hladiny akustických tlaků zapsaných do matic o osmnácti řádcích a osmi sloupcích. Tyto matice se staly základním vstupem pro algoritmus zpracování získaných výsledků.

### 10.3.2 Hlukové mapy a výpočet hladin akustických výkonů

Sestavení hlukových map a následný výpočet normované hladiny akustického výkonu byl proveden v programu *Matlab*. V prostředí *Matlab* byl vytvořen program, který provede vykreslení hlukové mapy nad železničním kolem v polárních souřadnicích a dále výpočet normované hladiny akustického výkonu. Program je součástí digitálních příloh této práce. Po zadání cesty k programu v dialogovém okně programu *Matlab* je tento možno spustit příkazem:

$$[\text{Lw}, \text{S}, \text{TOTAL}, \text{mikrofonu}, \text{dilu}] = \text{vykon}(\text{A}, \text{r}) \quad (29)$$

	A	-	Matice normovaných hladin akustických tlaků na měřicí ploše pro příslušnou budicí frekvenci
	r	-	Poloměr polokulové měřicí plochy (v tomto případě 0,95m)
	Lw	-	Matice normovaných hladin akustických výkonů na jednotlivých měřicích plochách
	S	-	Matice povrchů jednotlivých částí měřicí plochy
	TOTAL	-	Normovaná hladina akustického výkonu
	mikrofonu	-	Počet kanálů pro akustické měření
	dilu	-	Počet dílů měřicí plochy v obvodovém směru
*pozn.			
	Zadání		Výstup 

Připravený program je univerzálně použitelný pro zpracování dat z měření hladin akustických tlaků na polokulové měřicí ploše. Počet mikrofónů, stejně jako poloměr polokulové měřicí plochy a dělení plochy v obvodovém směru smí být voleno, v rozsahu hodnot přípustných dle [18] a [19], libovolný. Prezentace získaných výsledků je provedena v následující kapitole.

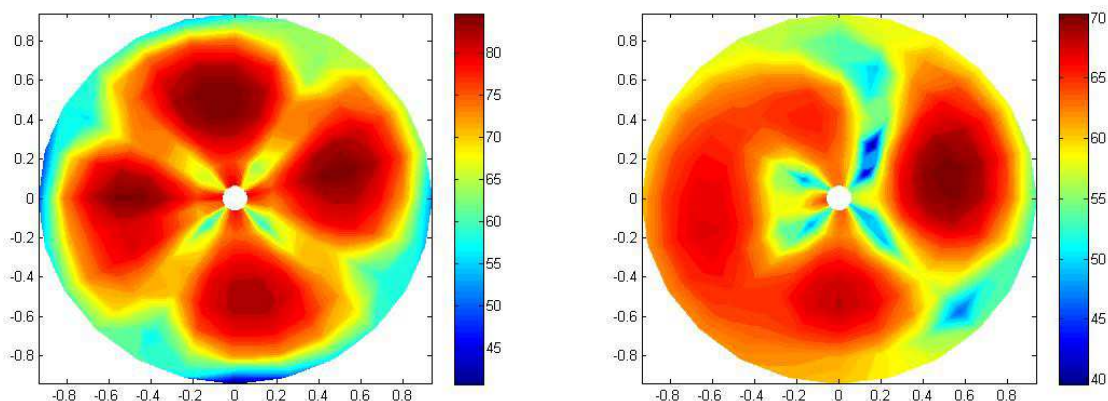
## 10.4 Výsledky provedených akustických měření

Akustické měření a následné zpracování dat bylo provedeno pro celkem třináct budicích frekvencí, které byly vybrány v kapitole 8.4.4.. Pro každý z těchto budicích kmitočtů bylo v první fázi změřeno nejdříve holé kolo (kolo bez tlumiče) a následně kolo s tlumičem. Jako reprezentativní vzorek tlumiče pro stanovení účinnosti byl na kolo osazen tzv. deskový tlumič.

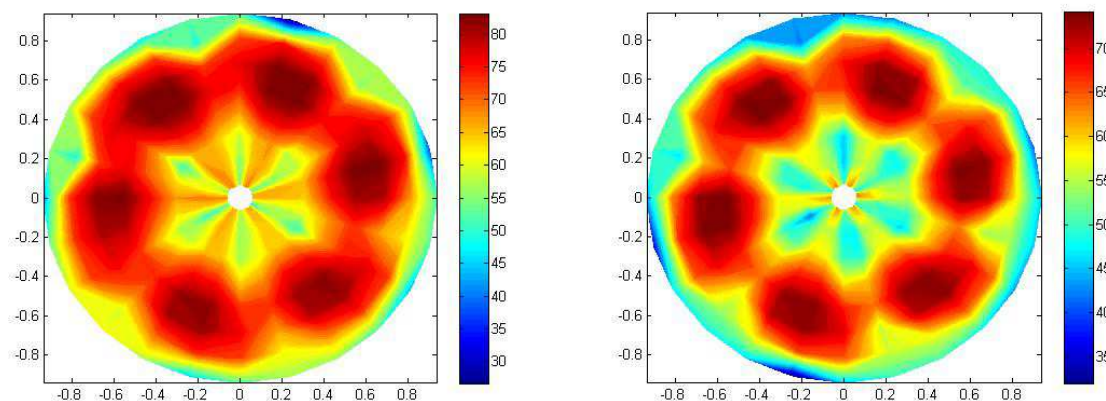


Obr.89: Deskový tlumič k osazení na diskovou část měřeného železničního kola

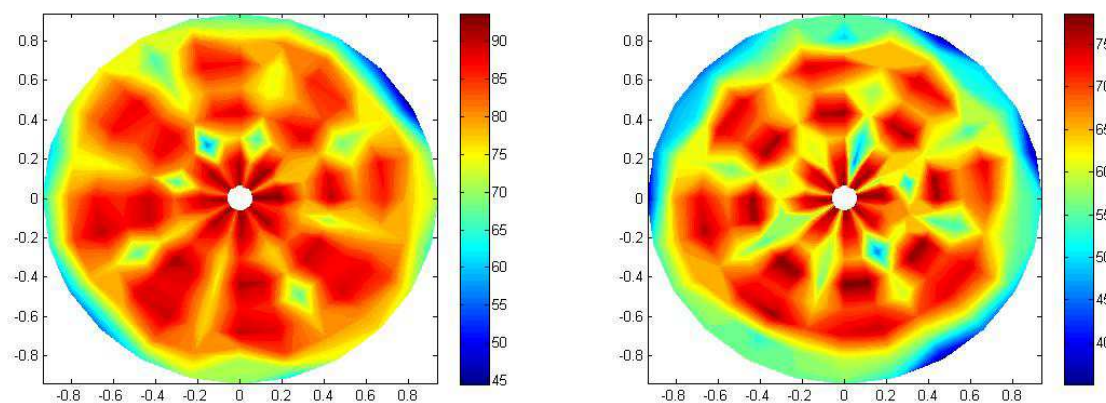
Dále je provedena prezentace výstupů z úlohy o sestavení hlukových map. V následujících grafech jsou vykresleny hladiny zjištěné hladiny akustických tlaků na polokulové měřicí ploše nad měřeným kolem. Vlevo vždy pro netlumené kolo, vpravo s osazeným deskovým tlumičem.



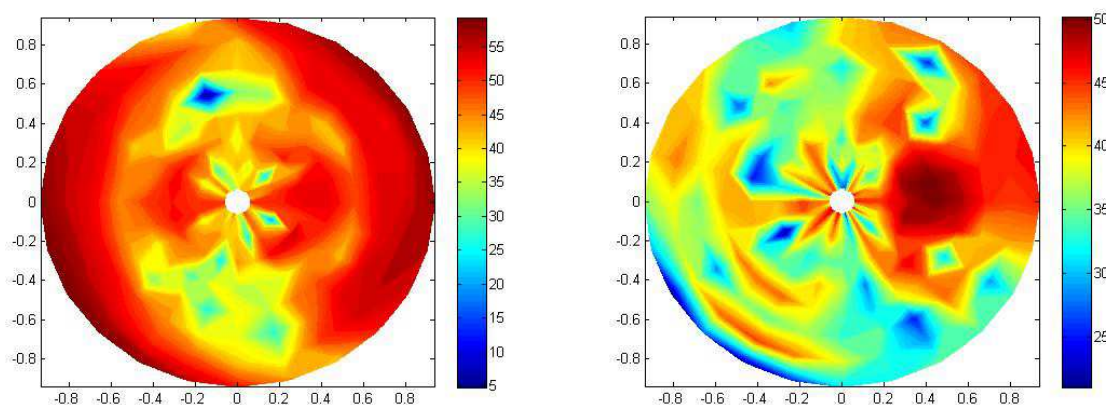
Obr.80: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 313Hz



Obr.81: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 889Hz

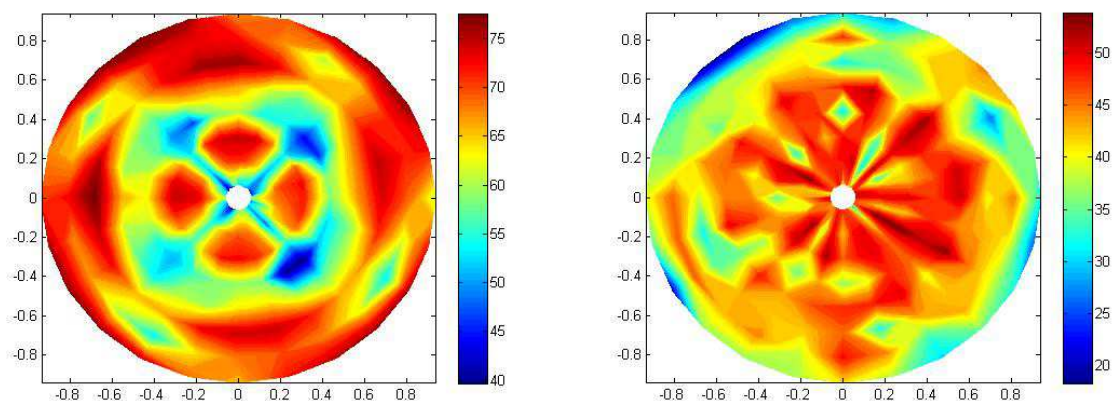


Obr.82: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 1634Hz

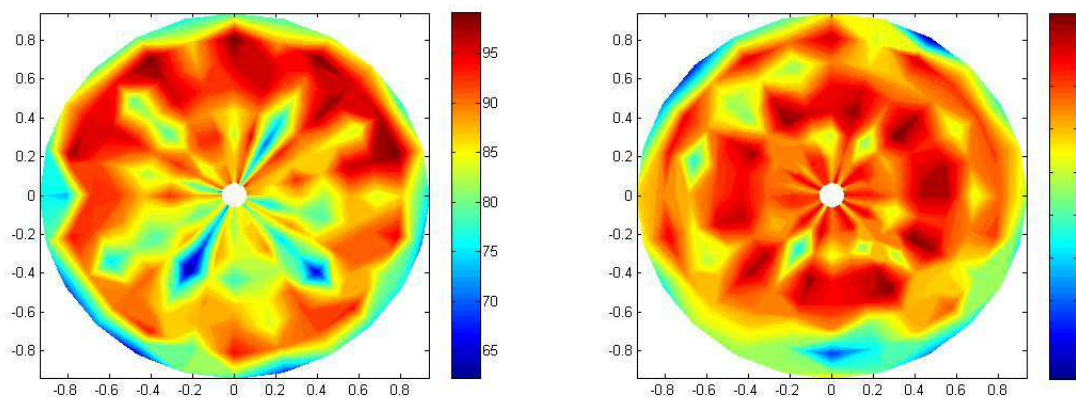


Obr.83: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 1940Hz

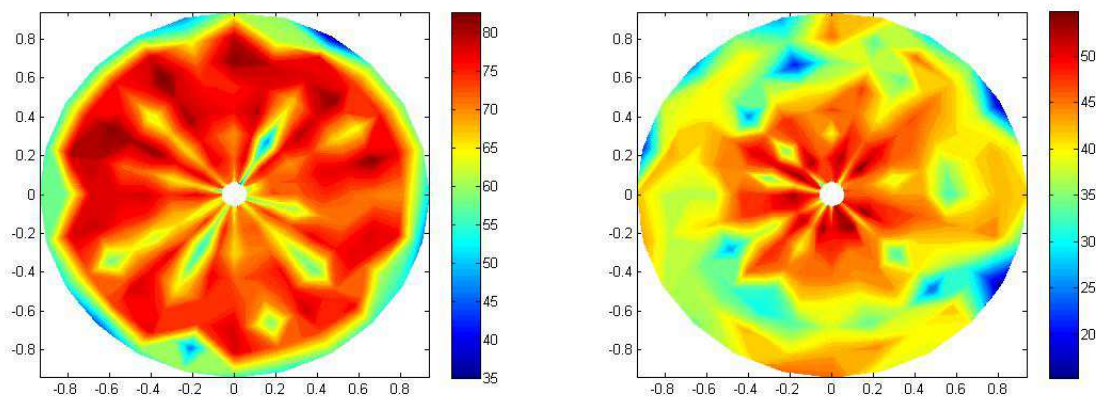




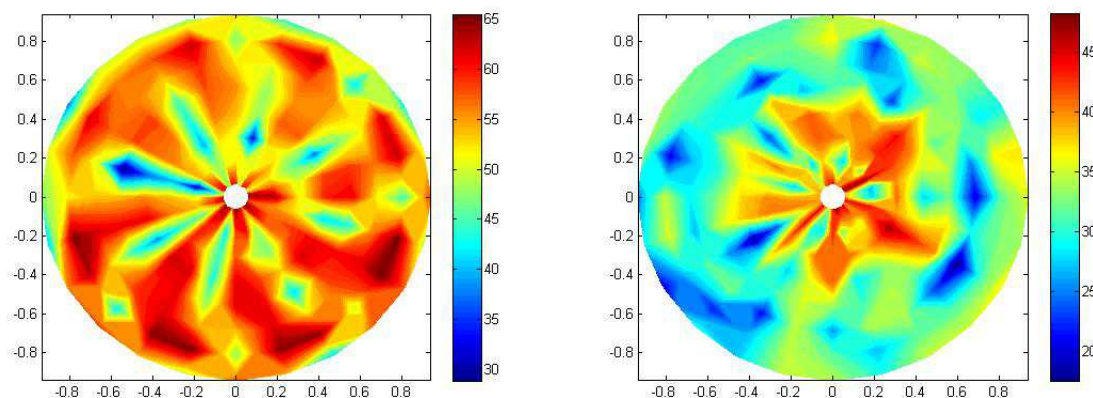
Obr.84: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 2427Hz



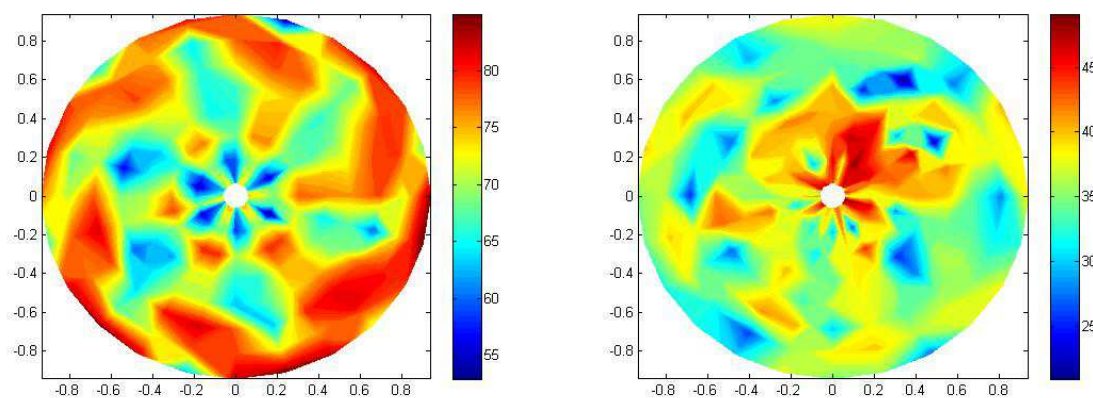
Obr.85: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 2457Hz



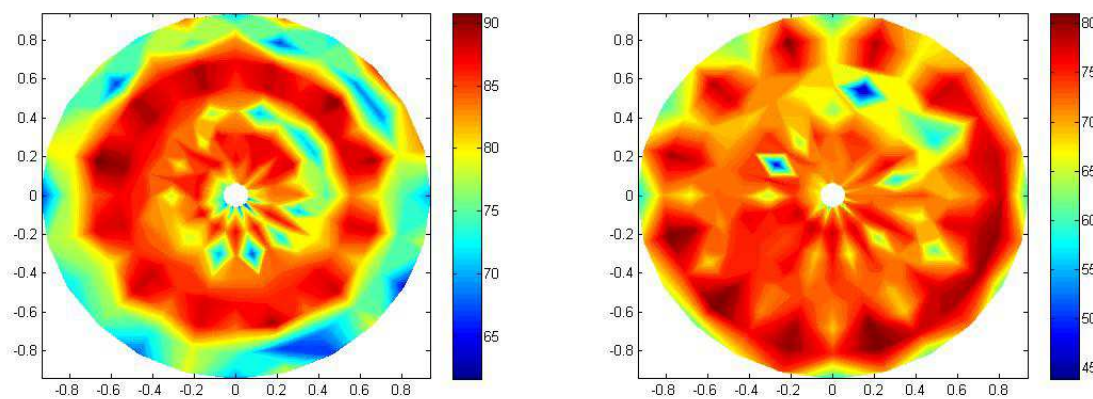
Obr.86: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 2705Hz



Obr.87: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 2767Hz

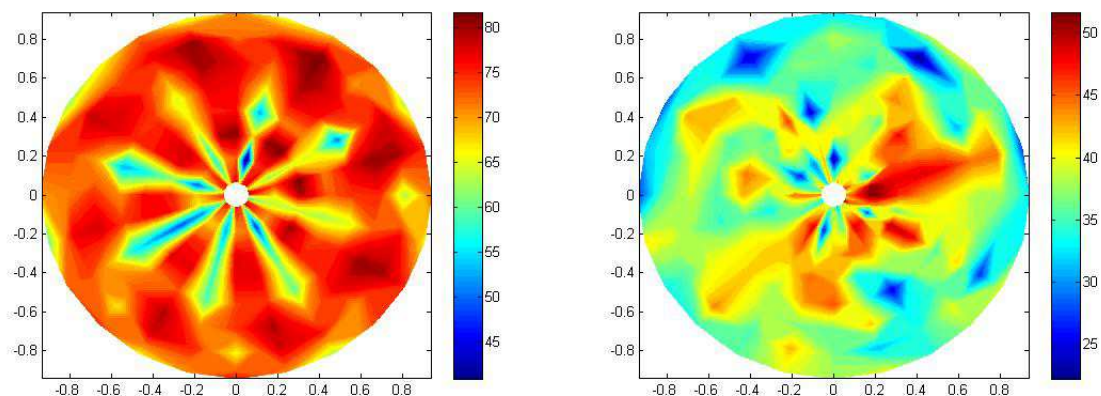


Obr.88: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 2969Hz

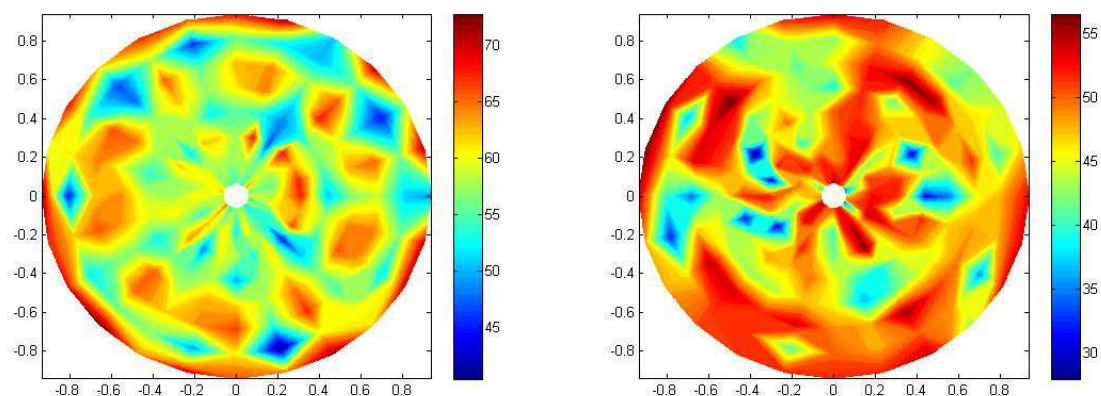


Obr.89: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 3365Hz

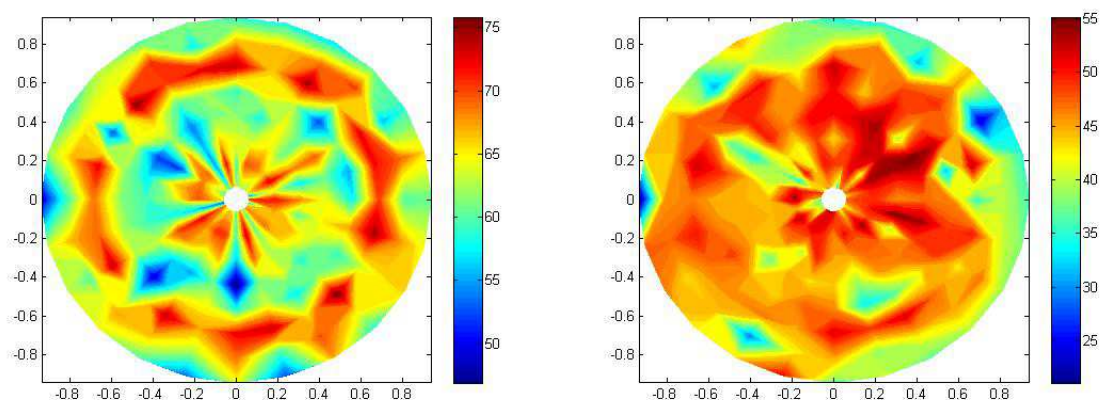




Obr.90: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 3609Hz



Obr.91: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 4352Hz



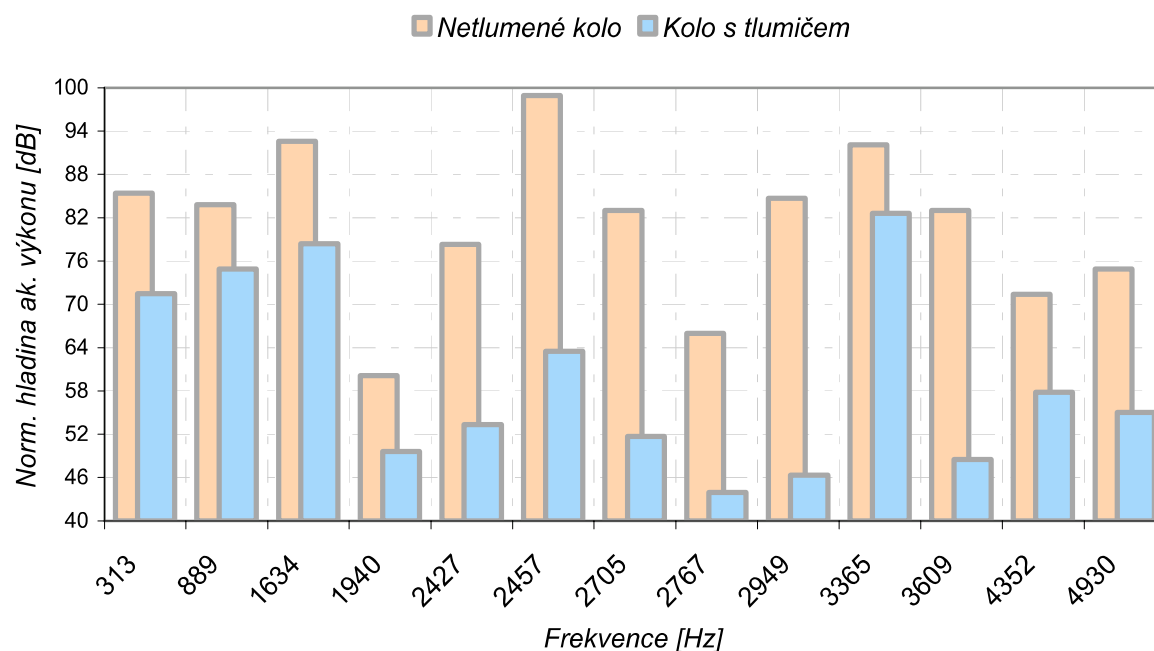
Obr.92: Hlukové mapy pro buzení jednotkovou harmonickou silou s frekvencí 4930Hz

Současně se sestavením hlukových map, pro každý budicí kmitočet, byl proveden i výpočet normované hladiny akustického výkonu.

Č.	Frekvence	Norm. hladina akustického výkonu $L_{WN}$ [dB@1N]	
		Holé kolo	Kolo s tlumičem
1.	313	85,4	71,5
2.	889	83,8	74,9
3.	1634	92,6	78,4
4.	1940	60,1	49,6
5.	2427	78,3	53,3
6.	2457	98,9	63,5
7.	2705	83,0	51,7
8.	2767	66,0	43,9
9.	2949	84,7	46,3
10.	3365	92,1	82,6
11.	3609	83,0	48,5
12.	4352	71,4	57,8
13.	4930	74,9	55,0

Tab.11: Normované hladiny akustických výkonů netlumeného kola a kola s tlumičem

Pro lepší přehlednost byly hodnoty uvedené v tab.46 zpracovány do grafu. Z grafu je na první pohled zřejmé, že pro každou z vybraných budicích frekvencí je osazený tlumič velmi efektivní.



Obr.93: Grafické znázornění normovaných hladin akustických výkonů netlumeného kola a kola s tlumičem

Dále bylo možné provést výpočet rozdílu normovaných hladin akustických výkonů pro jednotlivé budicí frekvence.

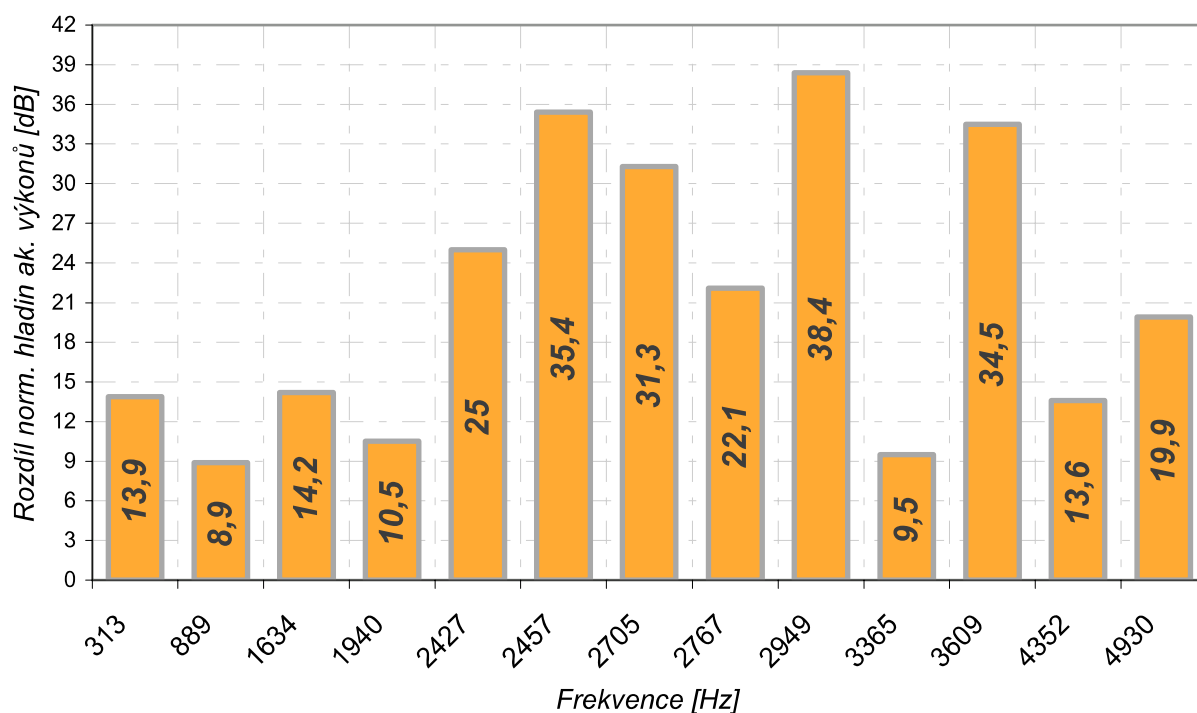
$$\Delta_{L_w} = L_{WN(BTL)} - L_{WN(STL)} \quad (30)$$

$L_{WN(BTL)}$  [dB] - Normalizovaná hladina akustického výkonu kola bez tlumiče.

$L_{WN(STL)}$  [dB] - Normalizovaná hladina akustického výkonu kola s tlumičem.

Číslo	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.
Fr.	313	889	1634	1940	2427	2457	2705	2767	2949	3365	3609	4352	4930
$\Delta_{L_w}$ [dB]	13,9	8,9	14,2	10,5	25,0	35,4	31,3	22,1	38,4	9,5	34,5	13,6	19,9

Tab.12: Vypočítané rozdíly normovaných hladin akustických výkonů



Obr.94: Grafické znázornění vypočítaných rozdílů normovaných hladin akustických výkonů

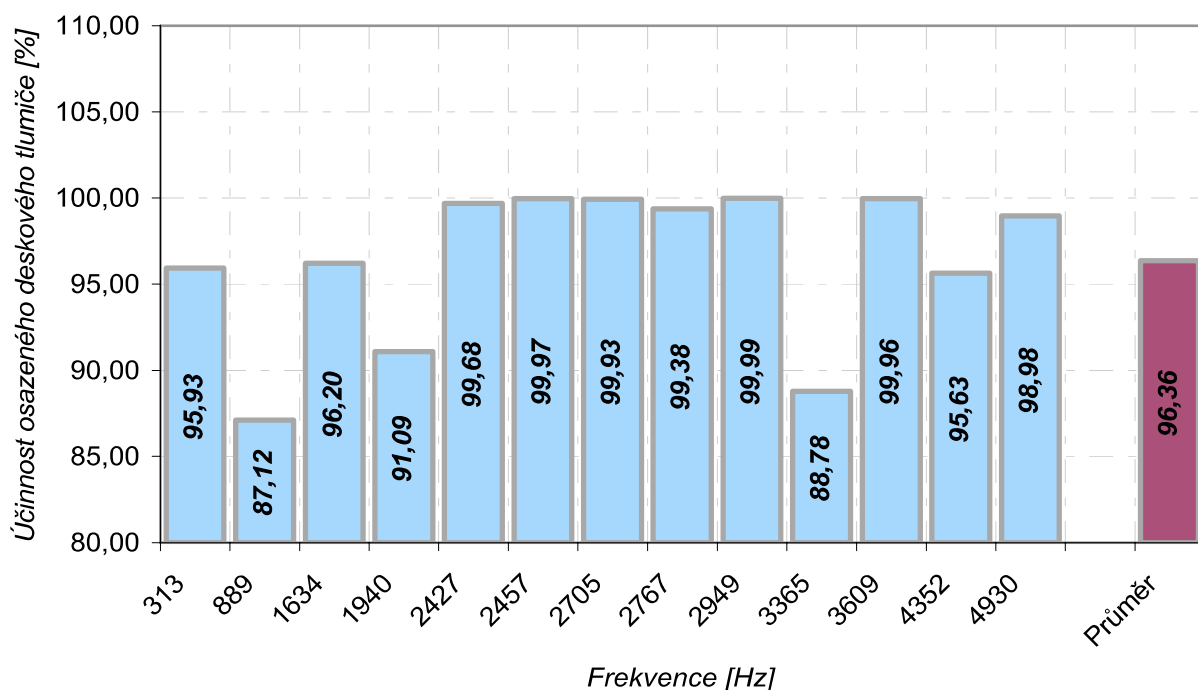
Posledním krokem výpočtu bylo zavedení výkonové účinnosti osazeného dynamického tlumiče [14]. Vztah použitý pro výpočet vychází z poměru zjištěných akustických výkonů holého kola a kola s osazeným tlumičem.

$$\eta_w = \left( 1 - \frac{W_{N(STL)}}{W_{N(BTL)}} \right) \cdot 100\% \quad (31)$$

V souladu s rovnicí (24) je možno vyjádření účinnosti (31) dále upravit na konečný tvar pro výpočet ze známých hodnot hladin akustických výkonů.

$$\eta_W = \left( 1 - \frac{10^{0,1 \cdot L_{WN}(STL)}}{10^{0,1 \cdot L_{WN}(BTL)}} \right) \cdot 100\% \quad (32)$$

Výkonové účinnosti osazeného deskového tlumiče jsou uvedeny v následujícím grafu. Graf je doplněn i údaj průměrné účinnosti, která byla vypočtena aritmetickým zprůměrováním přes všechny budící frekvence.



Obr.95: Grafické znázornění vypočítaných účinností osazeného deskového tlumiče

## 11 Závěr

Předložená práce podává obraz o rozsáhlém výzkumu dynamických vlastností železničního kola. Cílem experimentů, které jsou v práci popsány, bylo získat ucelenou představu o modálních a akustických vlastnostech železničního kola a jeho chování při buzení harmonickým signálem. Při řešení jednotlivých úloh bylo využito jednak standardních metod a měřicích technik a v mnohých případech také zcela nových technických experimentů odvozených na základě potřeb řešené úlohy. Získané výsledky a zejména vyzkoušené a ověřené postupy by měly být následně použitelné i pro jiné typy železničních kol a dvojkolí.

Experimentální práce na železničním kole byly zahájeny řešením úlohy experimentální modální analýzy. Cílem experimentální modální analýzy bylo získat vlastní frekvence, vlastní tvary volného kmitání železničního kola a v neposlední řadě hodnoty tlumení na jednotlivých vlastních tvarech kmitání. Ve sledovaném frekvenčním rozsahu, který byl zvolen s ohledem na akustickou významnost jednotlivých vlastních tvarů kmitání, bylo zjištěno celkem 35 vlastních tvarů kmitání, které bylo možno klasifikovat dle [9] jako radiální nebo axiální. Z těchto tvarů bylo v dalším postupu vybráno celkem 13 vlastních tvarů kmitání, které lze s ohledem na projev při vybuzení považovat za akusticky významné. Následovalo sestavení matematického modelu železničního kola pro řešení úlohy modální analýzy metodou konečných prvků. Model se podařilo odladit na velmi dobrou shodu s daty z experimentu. Srovnání vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitání získaných experimentálně na železničním kole a metodou konečných prvků na matematickém modelu je provedeno v příloze této práce. Ve sledovaném frekvenčním rozsahu nepřesáhla chyba ve zjištěné vlastní frekvenci u žádného z akusticky významných vlastních tvarů kmitání 8%. Větších chyb bylo dosaženo pouze u vlastních tvarů kmitání s frekvencí pod 100Hz, což nutně plyne z odlišností okrajových podmínek matematického modelu a měřeného železničního kola. V úloze experimentální modální analýzy by bylo vhodné v případě dalšího výzkumu vyzkoušet buzení pomocí dynamického budiče s vyšším výkonem a použití vícekanálového systému pro sběr dat s cílem zkrátit dobu potřebnou pro měření jednoho kola. Dalším přínosem bude bezesporu využití aplikace *Pulse Reflex* pro efektivní zpracování dat z měření, která se začala na katedře mechaniky VŠB-TU Ostrava využívat.

Experimentální část pokračuje řešením úlohy harmonické analýzy železničního kola. Provedená harmonická analýza prověřuje možnost vybuzení železničního kola na vlastních frekvencích zjištěných při experimentální modální analýze a dále předkládá několik cest vedoucích k jejich zpřesnění.

Harmonická analýza je provedena pro buzení osamělou harmonickou silou, a to hned v několika specifických směrech, podle nichž jsou rozděleny i výsledkové soubory. Velmi užitečným nástrojem při zpřesňování vlastních frekvencí železničního kola byla původní záznejlová metoda založená na sledování vývoje frekvenčního spektra při probíhajícím lineárním průměrování. V případě potřeby metoda umožňuje přiblížit měřenou vlastní frekvenci skutečné hodnotě s odchylkou menší než  $\pm 0,1\text{Hz}$ . V závěrečné části úlohy harmonické analýzy je proveden podrobný rozbor vlastností železničního kola z pohledu tlumení. Dále je zde diskutována otázka štěpení vlastních tvarů kmitání. Jsou zde popsány problémy vzniklé při stanovení tlumení u rozštěpení vlastních tvarů kmitání a v neposlední řadě navrženy postupy, vedoucí k eliminaci případných chyb. Ve vazbě na výsledky harmonické analýzy železničního kola byl i matematický model doplněn o tlumení. Opět bylo provedeno úspěšné srovnání experimentálních dat s výsledky provedené simulace. Budoucí kroky v oblasti harmonické analýzy budou představovat měření železničního kola s osazenými hlukovými tlumiči. Úloha se tak zásadním způsobem zkomplikuje, a to zejména v oblasti identifikace rozštěpených vlastních tvarů kmitání.

Akustická měření byla zahájena měřením akustické holografie metodou *Beamforming*. Měřením se podařilo úspěšně prokázat, že budicí účinky jsou pro celý vyšetřovaný frekvenční rozsah dostatečné, akustický projev je zřetelný, jednoznačný a dobře měřitelný. Při vybudění na příslušné rezonanci bylo dominantním zdrojem hluku vždy měřené kolo. Podobnost hlukových map a vizualizovaných vlastních tvarů kmitání je nad očekávání dobrá. Techniku měření metodou *Beamforming* se tedy bez předchozích zkušeností podařilo zprovoznit, použít a byla shledána velmi užitečnou.

Hlavní náplní úlohy akustických měření je odvození postupů vedoucích k posouzení účinností osazených tlumičů. V prvním kroku je navržen experiment, který v souladu s [19] vede k určení hladin akustických výkonů. S výhodou je zde zavedena norma na jednotkovou budicí sílu, což výrazně zlepšilo porovnatelnost výsledků. V závěrečné části akustické analýzy železničního kola jsou odvozeny jednoduché vztahy pro výpočet výkonové účinnosti hlukového tlumiče a celá procedura je prakticky vyzkoušena na příkladu deskového tlumiče s velmi dobrými výsledky. Lze předpokládat, že z pohledu dalšího výzkumu budou následná akustická měření velmi častá. Zcela určitě budou připraveny měřicí techniky pro buzení v radiálním směru a dále pro buzení úzkopásmovým šumovým signálem. Zvažována je rovněž úloha vycházející z rotační symetrie úlohy, která by významným způsobem ušetřila čas potřebný k měření jednoho vzorku. Řada kroků již byla podniknuta i v oblasti přípravy automatizovaného skenovacího měření sondou akustické intenzity.

## Conclusion

The presented PhD. project gives a picture of the extensive research of dynamic properties of railway wheel. The aim of the experiments that were described was to obtain a comprehensive overview of the modal and acoustic properties of railway wheel and its behavior when the harmonic signal excitation was used. During the solution of individual tasks were used both standard methods and measurement techniques and in many cases completely new technical experiments derived on the basis of needs of solved problem. The results and in particular tried and tested procedures should then be applied to other types of railway wheels and wheelsets.

The experiments on the railway wheel were started by the solution of experimental modal analysis. Main aim of the experimental modal analysis was to obtain natural frequencies mode shapes of vibration of railway wheel and finally damping the of the individual mode shapes. In the focused frequency range, which was chosen with regard to the significance of individual acoustic behavior of mode shape, it was found 35 of mode shapes of vibration that could be classified according to [9] as radial or axial. For these mode shapes set were further procedure selected a total of 13 custom mode shapes of vibration, which according to the acoustic response during excitation were sign like acoustically strong. In next step were build a mathematical model of railway wheel for solving modal FEM analysis. Finite element model was prepared to a very good compliance with the data from experiment. Comparison of natural frequencies and mode shapes obtained experimentally on a railway wheel and the finite element method on a mathematical model is presented in the appendix of this thesis. In the focused frequency range the error found in the natural frequency of any of the mode shape does not exceed value of 8%. Only in cases of mode shapes with frequencies below 100Hz some errors were attained, which necessarily follows from the divergence of the boundary conditions of the mathematical model and the measured rail wheel. The role of experimental modal analysis would be useful if further research to test the excitation using dynamic shaker with higher power level and use of multi-channel data acquisition system in order to reduce the time required to measure a railway wheel. Undoubtedly use of the Pulse Reflex application, which began at the Department of Mechanics VŠB-TU Ostrava use, will positively effect processing of measurement data.

The experimental part of the thesis continues by the solution of harmonic analysis of railway wheel. Performed harmonic analysis exploring the possibility of excitation of railway wheel on the natural frequencies identified in the experimental modal analysis and presents several possibilities leading higher accuracy level.

Harmonic analysis is performed for individual harmonic excitation force, and in several specific directions. Result sets were divided according to those directions. A very useful tool in verification process of natural frequencies of the railway wheel is echo method. This developed method is based on monitoring the behavior of the frequency spectrum at the current linear averaging. If necessary the echo method enlarges accuracy of value of the measured natural frequency in a tolerance of less than  $\pm 0.1$  Hz. In the final part of the task of harmonic analysis is performed a detailed analysis of the properties of railway wheels in terms of damping. Also the question of splitting of mode shapes is discussed. There are also described the problems arising from the determination of the damping in cases of the split mode shape and designed solutions resulting of errors. In relation to the results of harmonic analysis of railway wheel a mathematical model was completed by correct value of damping. Again was performed a successful comparison of experimental data with the results of simulations. Future steps in the field of harmonic analysis will be the measurement of railway wheel mounted by the noise dampers.

Acoustic measurements were started by measuring the acoustic holography using Beamformig method. Measurement was successfully demonstrated that the excitation effects are for the focused frequency range sufficient, audible speech is clear, unambiguous and well measurable. For each measurement was dominant source of noise always railway wheel. Noise maps from measurements and visualized mode shapes were similar above expectations. Bemforming method was used with no previous experience with very good result. It was found to be very useful.

The main aim of the acoustic measurements was to design procedure for the assessment of the effectiveness of installed noise dampers. The first step is design of the experiment according to [19] leads to the determination of the sound power level.

Preferably, there are established standards for unit excitation power, which greatly improved the comparability of results. In the final part of the acoustic analysis of railway wheel were formed simple equations for calculating the power efficiency of the noise damper and the whole procedure is practically tested on the example of the damper plate with very good results. It can be assumed that in view of further research should be acoustic measurements realized very often. Another step should prepare measurement technique for excitation in radial direction and for generating a narrow-band noise signal. Importance of rotational symmetry is also pondered, which would significantly save time required to measure a single sample. A number of steps have already been taken in the preparation of automated scanning probe measurement of sound intensity.



## 12 Přínosy pro vědní obor a technickou praxi

Přínos oboru aplikované mechaniky, vyplývající z výsledků této práce, je zejména v návrhu a praktické realizaci rozsáhlých úloh akustických měření a měření dynamických vlastností mechanické struktury. Výstupem práce je mimo jiné detailní popis postupů a měřících technik vedoucích k experimentálnímu sestavení hlukových map železničního kola a výkonových účinností hlukových tlumičů. Předložená disertační práce přináší v oblasti akustické analýzy poznatky plynoucí z dostupných pramenů, které však formulují řešení pouze v obecné rovině, na zcela konkrétní případ. Přestože bylo měřeným objektem konkrétní železniční kolo, lze navržené postupy velmi snadno uplatnit i u jiných struktur. Při řešení úlohy akustické analýzy bylo sestaveno několik původních SW aplikací pro zpracování rozsáhlých výsledkových souborů dle závazných standardů ISO.

Za další přínos oboru je možné považovat úspěšné zvládnutí úlohy měření akustické holografie, které bylo na VŠB-TU Ostrava provedeno vůbec poprvé a v jehož souvislosti byla navázána velmi dobrá spolupráce s odborníky z VUT-Brno.

V oblasti měření vibrací je významným přínosem práce odvození záznejové metody, což je zvláště vhodné pro přesnou lokalizaci rezonančních špiček u mechanických struktur s dlouhou dobou dozvuku. Záznejová metoda nachází své uplatnění zejména tam kde je potřeba zvýšit přesnost získaných hodnot vlastních frekvencí nad rozlišovací schopnost použitého FFT analyzátoru. Metoda při citlivém a pečlivém přístupu umožňuje získat hodnoty vlastních frekvencí měřených struktur až desetinásobně přesněji. V disertační práci je rovněž velmi podrobně popsán zcela nový postup při odhalování rozštěpených vlastních tvarů kmitání a to zejména na praktických příkladech se zcela konkrétními výsledky.

V širším smyslu lze za přínos považovat navrženou techniku postupné úpravy matematického modelu ve vazbě na prováděné experimenty. Dále použití celé řady měřících metod, z nichž některé nejsou zcela obvyklé. Předložená práce bezesporu najde své uplatnění při řešení obdobně obtížných úloh z oblasti experimentální mechaniky. Přestože jsou provedené experimenty vzájemně provázány, je možné jejich aplikaci na konkrétní úlohy technické praxe provést individuálně.

Připravený matematický model by měl být dále rozšířen o síť hraničních prvků simulujících okrajovou podmínku volného akustického pole [11], [12]. Rozšíření matematického modelu o síť hraničních prvků a řešení úlohy sdílených polí na takto připraveném matematickém modelu, bude jednoznačně předmětem dalšího vývoje řešeného problému, což je zcela v souladu se současnými požadavky technické praxe.

## Contribution for Science and Industry

Contribution for field of the Applied Mechanics, based on the results of this work is mainly in the design and implementation of large-scale practical tasks, acoustic measurement and measurement of the dynamic properties of the mechanical structure. The product of this thesis is among other things a detailed description of the procedures and measurement techniques leading to the experimental build of railway wheel's noise maps and the power efficiency of noise dampers. In the region of the acoustic analysis this thesis brings knowledge from available sources, which formulate solutions only in general terms, to the very specific application. Although the measured object was railway wheel, the proposed sequences can be easily applied any in other structures. During the acoustic analysis was compiled several original software applications for processing of large result files according to ISO standards. For additional contribution can be considered successful management task of acoustic holography measurement, which was at VŠB-TU Ostrava performed for the first time and in relation to this fact was established very good cooperation with experts from VUT Brno. In the field of vibration measurement is an important contribution design of the echo method, which is particularly suitable for precise localization of resonances in mechanical structures with a long reverberation time. The echo method is very useful in application where there is a need to increase the accuracy of the values of natural frequencies above the resolution of the used FFT analyzer. The echo method allows obtain the values of natural frequencies of structures measured up to ten times more accurately. The thesis also described in great detail a completely new procedure for the detection of spitted mode shapes and presents practical examples in concrete results.

In a broader sense, contribution is in proposed technique of step by step adjustment of the mathematical model in relation to the realized experiments. Also using a variety of measurement techniques where some of them are quite uncommon. The presented thesis undoubtedly finds its application in solving similarly difficult tasks in the field of experimental mechanics. Although the experiments are coupled, it is possible to apply them to specific technical tasks individually.

In another step should be mathematical model spread by the boundary element simulating the boundary condition of free acoustic field [11], [12].

Spreading of the mathematical model with boundary element reinforcement and solution of problem of the shared fields on such a mathematical model is clearly subject to further development of the presented topic, which is completely in line with current requirements of engineering practice.

## Seznam použité literatury

- [1] Cocker, J. M.. *Handbook of Noise and Vibration Control*. USA: John Wiley & Sons, Inc. 2007. 1038 s. ISBN 0-4713-9599-4
- [2] Randall, F. B.. *Industrial Noise Control and Acoustics*. Louisiana: Marcel Dekker, Inc. 2003. 534 s. ISBN 0-8247-0701-1
- [3] Smetana, C.. *Hluk a vibrace, měření a hodnocení*. Praha: Sdělovací technika. 1998. 188 s. ISBN 80-90 1936-2-5
- [4] Nový, R.. *Hluk a chvění*. Praha: Vydavatelství ČVUT. 1995. 386 s. ISBN 80-01-01306-5
- [5] Randall, R. B.. *Frequency Analysis*. Denmark: Bruel & Kjaer. 1987. 344 s. ISBN 978-87-835-5070
- [6] Tůma, J.. *Signal Processing, Kapitoly o Zpracování signálů*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava. 2008. 125 s
- [7] Tůma, J.. *Diagnostika strojů*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava. 2009. 138 s. ISBN 978-80-248-2116-0
- [8] Bilošová, A.. *Experimentální modální analýza*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava. 2010. 104 s
- [9] Thompson, D.. *Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modeling and Means of Control*. Oxford: Elsevier, 2009. 518 s
- [10] Johnson, C.. *Numerical solution of partial differential equations by the finite element method*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987. 277 s. ISBN 0-521-3475880
- [11] Estorf, O.. *Boundary Elements in Acoustics: Advances & Applications*. Technical University Hamburg: WIT Press, 2000. 476 s. ISBN 1-85312-556-3
- [12] Wu, T. V.. *Advances in Boundary Elements: Fundamentals and Computer codes*. USA: University of Kentucky, 2005. 238 s. ISBN 1-85312-570-9
- [13] Škvor, Z.. *Akustika a elektroakustika*. Academia, Praha 1991, ISBN 80-200 0461-0

- 
- [14] Bartsch, H. J.. Matematické vzorce. SNTL, Praha 1987
- [15] ČSN 01 1600 Akustika - Terminologie
- [16] ISO 2041 Vibration, shock and monitoring of condition - Glossary
- [17] EN ISO 3740 Akustika - Určení hladin akustického výkonu zdrojů hluku - Směrnice pro užití základních norem
- [18] EN ISO 3744 Akustika - Určení hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Technická metoda ve volném poli nad odrazivou rovinou
- [19] EN ISO 3745 Akustika - Určení hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Přesné metody pro bezodrazové a polobezodrazové místnosti
- [20] EN ISO 3095 Železniční aplikace - Akustika - Měření hluku vyzařovaného kolejovými vozidly
- [21] EN ISO 3381 Železniční aplikace - Akustika - Měření hluku uvnitř kolejových vozidel
- [22] Butorina, M.. Comparative Analysis of railway noise attenuation. In *The 16<sup>th</sup> International Congress on Sound and Vibration*.
- [23] Park, CH.S.. Analysis Problem in Acoustic Holography. In *The 16<sup>th</sup> International Congress on Sound and Vibration*.
- [24] Oey, A.. Acoustical Holography For The Measurement of Transient Power Flow in a Thin Plate Due to an Impulsive Loading. In *The 16<sup>th</sup> International Congress on Sound and Vibration*.

## Seznam publikační činnosti doktoranda

- [25] VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, Ostrava - Poruba, CZ. *Závěs dveří experimentálních místností*. Původce vynálezu: Michal Weisz, Ing. Česká republika. Patentový spis 303379.
- [26] Weisz, M.: Determination of The Basic Parameters and Characteristics of Semi-Anechoic Room. In *The 16<sup>th</sup> International Congress on Sound and Vibration, 5-9 July 2009, Kraków, Poland*. International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), 2009, ISBN 978-83-60716-71-7
- [27] Weisz, M.: *Srovnávací analýza a verifikace dynamických vlastností*. Výzkumná zpráva projektu MPO 2A-3TP1/110. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2010.
- [28] Weisz, M.: *Stanovení frekvenčních přenosů mezi harmonickým buzením netlumeného železničního kola a hlukem tímto kolem vyzářeným*. Výzkumná zpráva projektu MPO 2A-3TP1/110. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2010.
- [29] Weisz, M.: *Test Report on Sound Signaling Device*. Technický zpráva. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2010.
- [30] Weisz, M.: *Měření impulsních hluků automobilových dveřních zámků*. Technická zpráva. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2010.
- [31] Weisz, M.: *Akustický projekt polobezodrazové místnosti pro akustická měření společnosti Emerson Climate Technologies - Mikulov*. Technická a projektová dokumentace. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2010.
- [32] Weisz, M.: *Akustický projekt polobezodrazové místnosti pro akustická měření společnosti Siemens Elektromotory - Mohelnice*. Technická a projektová dokumentace. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011.
- [33] Weisz, M.: *Akustický projekt polobezodrazové místnosti pro akustická měření společnosti VUT - Brno - ÚK - obor konstruování strojů*. Technická a projektová dokumentace. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011.

- 
- [34] Weisz, M.: *Akustický projekt polobezodrazové místnosti pro akustická měření společnosti Protherm - Skalica - SK*. Technická a projektová dokumentace. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2012.
- [35] Weisz, M.: *Akustický projekt bezodrazové místnosti pro akustická měření společnosti VUT - Brno - FSI - odbor spalovacích motorů*. Technická a projektová dokumentace. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2013.
- [36] Weisz, M.: *Hodnocení způsobilosti polobezodrazové místnosti pro akustická měření dle ISO 3745*. Technická zpráva, VUTS - Liberec. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2012.
- [37] Weisz, M.: *Měření dynamických vlastností a základních parametrů bezpečnostního zastavení regulovatelných rekuperačních převodníků*. Technická zpráva, Ochi Inženýring - Ostrava. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2012.
- [38] Weisz, M.: *Měření hluku zadních skupinových světilen buzených audio-systémem osobního automobilu*. Technická zpráva, Škoda Auto - Mladá Boleslav. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2013.
- [39] Weisz, M.: *Určení hladin akustických výkonů průmyslové pračky dle ISO 3744*. Technická zpráva, Primus - Příbor. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2010.
- [40] Weisz, M.: *Měření frekvenčních charakteristik reproduktorů užitím autokorelační funkce*. Návrh metodiky měření. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2012.
- [41] Weisz, M.: *Měření a vyhodnocování impulsních hluků hodnocení z pohledu kvality*. Technická zpráva. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2012.